

Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη βραχυκυκλώματος σε σταθμό παραγωγής
ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με το πρότυπο IEC
60909. Έλεγχος μεταβατικής ευστάθειας με την χρήση
του λογισμικού EMTP/ATP.**

Πουρτσίδης Γεώργιος

A.M. : 33099

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

ΜΑΛΑΤΕΣΤΑΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ

Thesis Subject

Short circuit study and transient analysis of a Power unit

- **Calculation of short circuit currents based on IEC 60909**
- **Analysis of the transient behavior of the generator during short circuits.**



Πρόλογος

Αφορμή για την πραγματοποίηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας στάθηκε η εργασιακή εμπειρία μου σε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της πρακτικής μου άσκησης.

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τους μηχανικούς, καθώς και τους τεχνικούς, του σταθμού για την διάθεση συνεργασίας με την οποία με αντιμετώπισαν, καθώς και την υπομονή και κατανόηση που έδειξαν στις όποιες απορίες μου.

Θα ήθελα επίσης να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον Δημήτρη Ν. Κονιδάρη, Δρ. Ηλεκτρολόγο-Μηχανολόγο Μηχανικό, που με την καθοδήγηση, τις παρατηρήσεις και την άριστη γνώση του όσον αφορά τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, συνέβαλε καθοριστικά στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Η επιστημονική προσέγγιση των θεμάτων που πραγματεύεται και η μεθοδικότητα στο τρόπο εργασίας του αποτελούν παράδειγμα προς μίμηση για μένα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, Ναταλία και Μιχάλη, για τη βοήθεια τους στην επιμέλεια των διαφόρων σχεδίων και σχημάτων καθώς και την οικογένεια μου για την αδιάκοπη συμπαράσταση τους.

Πίνακας Περιεχομένων

Σελίδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	viii
ΣΥΜΒΟΛΑ.....	ix
ΔΕΙΚΤΕΣ.....	xi
ΕΚΘΕΤΕΣ	xii

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Γενική θεώρηση και υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων

1.1 Γενικά	1
1.2 Αναλυτικός υπολογισμός της εντάσεως βραχυκυκλώσεως.....	2
1.2.1 Σφάλμα μακριά από τη γεννήτρια	5
1.2.2 Σφάλμα κοντά στη γεννήτρια.....	9
1.3 Μετασηματισμός συμμετρικών συνιστωσών	11
1.3.1 Ανάλυση σφαλμάτων με την μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών	14
1.3.1.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με γη	15
1.3.1.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη	17
1.3.1.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη	19
1.3.1.4 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Περιγραφή του προτύπου IEC 60909

2.1 Γενικά	24
2.2 Παραδοχές μεθόδου υπολογισμού	25
2.3 Μέθοδος ισοδύναμης πηγής τάσεως.....	27
2.4 Σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως.....	29
2.5 Υπολογισμός εντάσεων βραχυκυκλώσεως.....	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυσμένου κύκλου

3.1 Γενικά	33
3.2 Αεριοστρόβιλος.....	36

3.3 Ατμοστρόβιλος.....	38
3.4 Ατμοπαραγωγός ανακτήσεως θερμότητας	40
3.5 Γενικά στοιχεία μονάδος& δεδομένα	42
3.5.1 Γεννήτρια Ε.Ρ.	44
3.5.2 Μ/Σ μονάδος	46
3.5.3 Μ/Σ βοηθητικών μονάδος.....	48
3.5.4 Βοηθητικά φορτία μονάδος	49
3.5.5 Το άπειρο δίκτυο των 400 kV	51
3.5.6 Εναέρια γραμμές μεταφοράς	52
3.6 Μονογραμμικό διάγραμμα μονάδος	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων κατά IEC 60909	
4.1 Γενικά	54
4.2 Υπολογισμός συνθέτων αντιστάσεων βραχυκυκλώσεως επιμέρους συνιστωσών	54
4.2.1 Δίκτυο τροφοδοσίας	54
4.2.2 Εναέρια γραμμές των 400 kV	56
4.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια	57
4.2.4 Μ/Σ μονάδος	60
4.2.5 Ηλεκτροπαραγωγός μονάδα με ΣΑΤΥΦ	61
4.2.6 Μ/Σ βοηθητικών μονάδος.....	63
4.2.7 Ασύγχρονοι κινητήρες Μ.Τ.....	66
4.2.8 Μ/Σ & κινητήρες Χ.Τ.....	69
4.3 Αναλυτικός υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου	71
4.3.1 Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_k	71
4.3.2 Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p	72
4.3.3 Συμμετρική ένταση διακοπής I_b	73
4.3.4 Ένταση βραχυκυκλώσεως μόνιμου καταστάσεως I_k	74
4.4 Αναλυτικός υπολογισμός μονοφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου	76
4.4.1 Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_{k1}	76
4.4.2 Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_{p1}	79

4.4.3 Συμμετρική ένταση διακοπής I_{b1} & ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως I_{k1}	80
4.5 Αναλυτικός υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας	80
4.5.1 Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_k	80
4.5.2 Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p	82
4.5.3 Συμμετρική ένταση διακοπής I_b	83
4.5.4 Ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως I_k	83
4.6 Αναλυτικός υπολογισμός μονοφασικού βραχυκυκλώματος σε ακροδέκτη της γεννήτριας	84
4.6.1 Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_{k1}	84
4.6.2 Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_{p1}	87
4.6.3 Συμμετρική ένταση διακοπής I_{b1} & ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως I_{k1}	88
4.7 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων κατά IEC 60909 με χρήση του λογισμικού NEPLAN	88
4.7.1 Το λογισμικό NEPLAN	88
4.7.2 Υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων	88
4.7.3 Υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου	91
4.7.4 Υπολογισμός μονοφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου	93
4.7.5 Υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας	96
4.7.6 Υπολογισμός μονοφασικού βραχυκυκλώματος σε ακροδέκτη της γεννήτριας	98
4.7.7 Υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στον υποσταθμό Υ.Τ.	101
4.7.8 Υπολογισμός μονοφασικού βραχυκυκλώματος στον υποσταθμό Υ.Τ.	103
4.7.9 Υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό Α των 6.3 kV	106

4.8 Σχόλια.....	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Μεταβατική μελέτη σταθμού παραγωγής & το πρόγραμμα	
EMTP/ATP	
5.1 Γενικά περί μεταβατικής ευστάθειας.....	111
5.2 Περί μεταβατικής μελέτης.....	112
5.3 Το πρόγραμμα EMT/ATP	113
5.4 Προσομοίωση γεννήτριας E.P.	114
5.5 Προσομοίωση ρυθμιστή τάσεως & σταθεροποιητή ισχύος	116
5.6 Προσομοίωση M/Σ μονάδος	121
5.7 Προσομοίωση M/Σ βοηθητικών μονάδος.....	127
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα μεταβατικής μελέτης & σχολιασμός	
6.1 Γενικά	131
6.2 Λειτουργία συνδυασμένου κύκλου	132
6.3 Λειτουργία ανοιχτού κύκλου	137
6.4 Σχόλια.....	139
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	141
ΥΠΟΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ	143

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο υπολογισμός των βραχυκυκλωμάτων στην ευρύτερη ηλεκτρολογική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγού μονάδος, καθώς και η διεξαγωγή μεταβατικής μελέτης για την ευστάθεια της μονάδος εν σχέσει προς επιλεγμένα σφάλματα.

Αρχικά παρουσιάζεται η γενική θεώρηση και ανάλυση των βραχυκυκλωμάτων. Ο υπολογισμός των μεγεθών του βραχυκυκλώματος αναλύεται περαιτέρω με βάση το πρότυπο IEC 60909. Ακολουθεί περιγραφή της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος συνδυσμένου κύκλου όπου θα διεξαχθεί η μελέτη βραχυκυκλώματος. Κατ' αρχήν παρέχεται ο βήμα προς βήμα υπολογισμός επιλεγμένων βραχυκυκλωμάτων, ακολουθεί δε η πλήρης μελέτη αυτών σε διάφορες θέσεις. Η τελευταία διεξάγεται με το ειδικό λογισμικό NEPLAN. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται εν σχέσει και με τις απαιτήσεις οι οποίες επιβάλλονται στον ηλεκτρολογικό εξοπλισμό.

Ακολουθεί η μεταβατική μελέτη ευστάθειας της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος εν σχέσει προς τριφασικό βραχυκύκλωμα σε μία από τις δύο γραμμές μέσω των οποίων συνδέεται στο δίκτυο. Παρέχονται πληροφορίες για την ορθή και ακριβή προσομοίωση των συνιστωσών της μονάδος και σχολιάζονται τα αποτελέσματα. Ως εργαλείο για την διεξαγωγή της μελέτης μεταβατικής ευστάθειας χρησιμοποιείται το λογισμικό EMTP/ATP.

Λέξεις Κλειδιά

βραχυκύκλωμα, ένταση βραχυκυκλώσεως, συμμετρικές συνιστώσες, μεταβατική ευστάθεια, προσομοίωση, σύγχρονη γεννήτρια, ηλεκτροπαραγωγός μονάδα, M/Σ ανυψώσεως, EMTP/ATP, NEPLAN, IEC 60909

Abstract

The purpose of this thesis is the calculation of short circuit currents in the electrical installation of a Power unit, as well as conducting a transient analysis on the stability of the unit relative to selected faults.

Initially, an overview and analysis of the short circuits is presented. The calculation of the short circuit currents is further analyzed based on the standard IEC 60909, followed by a description of the Combined Cycle Power Plant (CCPP) for which the short circuit analysis is conducted. In principal, the step by step calculation of selected fault currents is provided, followed by the complete study for various positions inside the electrical installation. The latter is performed using NEPLAN software. The results are commented upon in relation to the requirements imposed on the electrical equipment of the Power unit.

Finally, a transient stability analysis of the Power unit is conducted, in relation to a three phase short circuit in one of the two lines through which the Power unit is connected to the grid. Information about the correct and accurate simulation of the components of the unit is provided and results are presented and commented. Software EMTP/ATP is used as a tool for conducting the transient stability analysis.

Keywords

short circuit, fault current, symmetrical components, transient stability, simulation, synchronous generator, power unit, step up transformer, EMTP/ATP, NEPLAN, IEC 60909

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ε.Ρ.	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
Σ.Ρ.	Συνεχές Ρεύμα
Υ.Τ.	Υψηλή Τάση
Μ.Τ.	Μέση Τάση
Χ.Τ.	Χαμηλή Τάση
Α/Σ	Αεριοστρόβιλος
Υ.Π.	Υψηλή Πίεση
Μ.Π.	Μέση Πίεση
Χ.Π.	Χαμηλή Πίεση
Σ.Η.Ε.	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
Μ/Σ	Μετασχηματιστής
ΣΑΤΥΦ	Σύστημα Αλλαγής Τάσεως Υπό Φορτίο
α.μ.	Ανά Μονάδα
r.m.s.	Root Mean Square (Ενεργός Τιμή)
AVR	Automatic Voltage Regulator (Αυτόματος Ρυθμιστής Τάσεως)
PSS	Power System Stabilizer (Σταθεροποιητής Σ.Η.Ε.)
IEC	International Electrotechnical Commission
IEV	International Electrotechnical Vocabulary
ANSI	American National Standards Institute
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
BTD	Bus Transfer Device
CCPP	Combined Cycle Power Plant
HRSG	Heat Recovery Steam Generator(Ατμοπαραγωγός Ανακτήσεως Θερμότητας)
SSD	Static Starting Device
EMTP	Electro Magnetic Transient Programming
BPA	Bonneville Power Administration
TACS	Transient Analysis of Control Systems

Σύμβολα

$\underline{a}$	Μοναδιαίος στρόφας
a	Λόγος της εντάσεως βραχυκυκλώσεως ασύμμετρου σφάλματος προς την ένταση βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος
α	Γωνία αντιστοιχούσα στην χρονική στιγμή κατά την οποία λαμβάνει χώρα το βραχυκύκλωμα
c	Συντελεστής τάσεως
E''	Υπομεταβατική τάση σύγχρονης γεννήτριας (E''_g κατά ANSI)
F	Θέση σφάλματος
f	Συχνότητα (50 Hz)
I_b	Συμμετρική ένταση διακοπής
I_k	Ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως
I''_k	Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως
I_{LR}	Ένταση ακινητοποιημένου δρομέα
I_r	Ονομαστική ένταση
I_{th}	Θερμικό ισοδύναμο εντάσεως βραχυκυκλώσεως
$i_{a.c.}$	Ημιτονοειδής συνιστώσα Ε.Ρ. της εντάσεως βραχυκυκλώσεως
$i_{d.c.}$	Απεριοδική συνιστώσα Σ.Ρ. της εντάσεως βραχυκυκλώσεως
i_p	Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως
K	Συντελεστής διορθώσεως συνθέτων αντιστάσεων
p	Ζεύγη πόλων ασύγχρονου κινητήρα
P_{krT}	Απώλειες Joule των τυλιγμάτων του Μ/Σ για ονομαστικό ρεύμα
P_{rM}	Ονομαστική ενεργός ισχύ ασύγχρονου κινητήρα ($P_{rM} = S_{rM} \cos \varphi_{rM} n_{rM}$)
q	Συντελεστής για τον υπολογισμό της συμμετρικής εντάσεως διακοπής ασύγχρονου κινητήρα
q_n	Ονομαστική διατομή
R, r	Ωμική αντίσταση, απόλυτη και ανά μονάδα τιμή αντιστοίχως
S''_k	Αρχική συμμετρική ισχύς βραχυκυκλώσεως
S_r	Ονομαστική φαινόμενη ισχύς
t_{cr}	Κρίσιμος χρόνος εκκαθαρίσεως
t_{min}	Ελάχιστη χρονική καθυστέρηση (χρονικό διάστημα)

U_m	Μέγιστη τάση λειτουργίας, πολική τιμή (r.m.s)
U_r	Ονομαστική τάση, πολική τιμή (r.m.s)
u_{kr}	Ονομαστική τάση βραχυκυκλώσεως M/Σ, τοις εκατό
u_{Rr}	Ονομαστική ωμική συνιστώσα τάσεως βραχυκυκλώσεως M/Σ, τοις εκατό
u_{Xr}	Ονομαστική επαγωγική συνιστώσα τάσεως βραχυκυκλώσεως M/Σ, τοις εκατό
X, x	Επαγωγική αντίδραση, απόλυτη και ανά μονάδα τιμή αντιστοίχως
X_d	Σύγχρονη αντίδραση ευθέος άξονα
X_q	Σύγχρονη αντίδραση εγκάρσιου άξονα
Z, z	Σύνθετη αντίσταση, απόλυτη και ανά μονάδα τιμή αντιστοίχως
n	Απόδοση ασύγχρονου κινητήρα
κ	Συντελεστής για τον υπολογισμό της τιμής κορυφής εντάσεως βραχυκυκλώσεως
λ	Συντελεστής για τον υπολογισμό της εντάσεως βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως
φ	Φασική γωνία
θ_e	Θερμοκρασία αγωγού στο τέλος του βραχυκυκλώματος
01	Ουδέτερος συστήματος θετικής ακολουθίας
02	Ουδέτερος συστήματος αρνητικής ακολουθίας
00	Ουδέτερος συστήματος μηδενικής ακολουθίας

ΔΕΙΚΤΕΣ

(1)	Συνιστώσα Θετικής Ακολουθίας
(2)	Συνιστώσα Αρνητικής Ακολουθίας
(0)	Συνιστώσα Μηδενικής Ακολουθίας
a.c.	Εναλλασσόμενο ρεύμα
d.c.	Συνεχές ρεύμα
k	Τριφασικό βραχυκύκλωμα
k1	Μονοφασικό βραχυκύκλωμα
k2	Διφασικό βραχυκύκλωμα
k2E	Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη
K	Σύνθετη αντίσταση υπολογισμένη με χρήση συντελεστή διορθώσεως K
max	Μέγιστο/η
min	Ελάχιστο/η
n	Ονομαστική τιμή (βλέπε IEC ref. 151-16-09)
r	Τιμή προδιαγραφών (βλέπε IEC ref. 151-16-08)
t	Ανηγμένη τιμή
AT	Βοηθητικός Μ/Σ
E	Γη
G	Γεννήτρια
HV	Υψηλή τάση, τύλιγμα υψηλής τάσης Μ/Σ
LV	Χαμηλή τάση, τύλιγμα χαμηλής τάσης Μ/Σ
L	Γραμμή, Φάση
LR	Ακίνητοποιημένος Δρομέας
M	Ασύγχρονος κινητήρας ή ισοδύναμο ομάδας κινητήρων
~~M~~	Χωρίς κινητήρα
N	Ουδέτερος τριφασικού συστήματος Ε.Ρ.
p	Κορυφή, μέγιστη τιμή
Q	Σημείο συνδέσεως με δίκτυο τροφοδοτήσεως
S	Ηλεκτροπαραγωγός μονάδα με ΣΑΥΦ
sat	Κορεσμένη τιμή
T	Μετασχηματιστής

Εκθέτες

- “ Αρχική (υπομεταβατική) τιμή
- ‘ Μεταβατική Τιμή

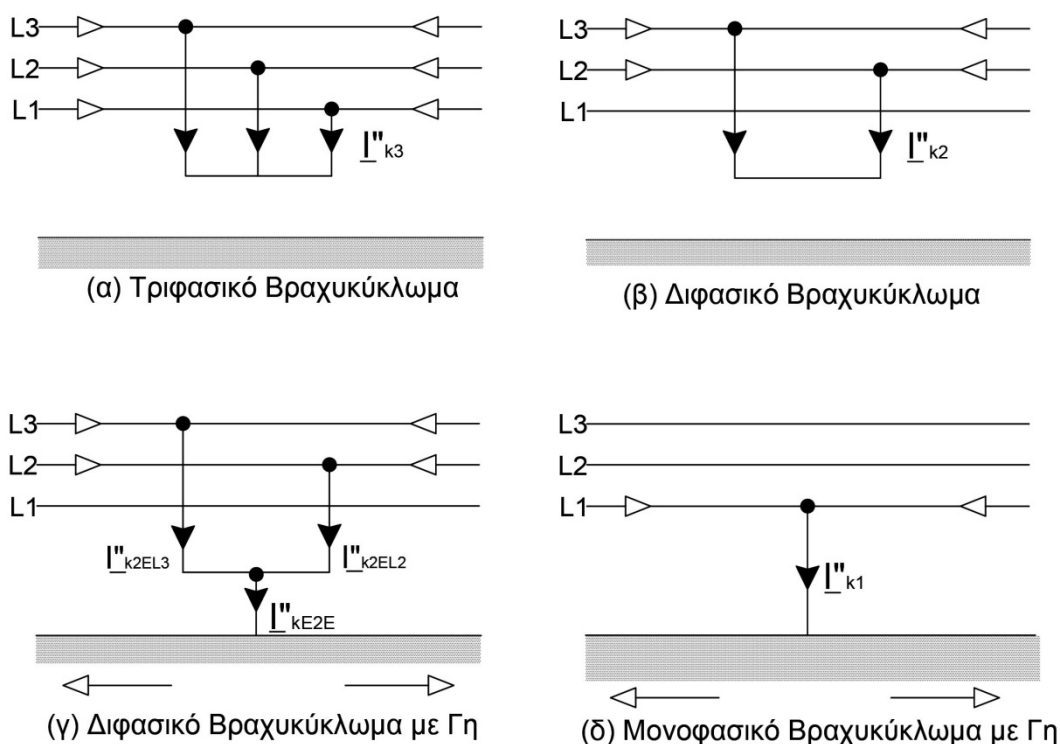
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Γενική θεώρηση και υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων

1.1 Γενικά

Ως βραχυκύκλωμα ορίζεται από τον κανονισμό IEC 60909-0, [1], η τυχαία ή σκόπιμη δημιουργία αγώγιμου δρόμου μεταξύ δύο ή περισσότερων αγώγιμων μερών, η οποία προκαλεί μηδενισμό ή ελαχιστοποίηση της διαφοράς ηλεκτρικού δυναμικού.

Σε μια ηλεκτρολογική εγκατάσταση μπορούν να παρουσιαστούν διάφοροι τύποι βραχυκυκλωμάτων, ήτοι μονοφασικά (τα οποία ανέρχονται στο 80% του συνόλου), διφασικά (ανερχόμενα στο 15% των σφαλμάτων) και τριφασικά (αποτελούν μόνο το 5% των αρχικών σφαλμάτων), βλέπε σχ. 1.1.



Σχήμα 1.1: Τύποι βραχυκυκλωμάτων^{1.1}

Μια περαιτέρω διάκριση μπορεί να γίνει με βάση τα παρακάτω χαρακτηριστικά των βραχυκυκλωμάτων:

- Με βάση την διάρκεια, διακρίνονται σε μεταβατικά ή μονίμου καταστάσεως.

- Με βάση την προέλευση, αυτή μπορεί να αποδοθεί σε σπασμένο αγωγό, ακούσια ηλεκτρική επαφή μεταξύ δύο αγωγών μέσω ενός ξένου αγώγιμου σώματος όπως ένα εργαλείο ή ένα ζώο, σε εσωτερικές ή ατμοσφαιρικές υπερτάσεις, ή σε καταστροφή της μονώσεως του εξοπλισμού λόγω θερμότητας, υγρασίας ή διαβρωτικού περιβάλλοντος.
- Ως προς την θέση, αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως εσωτερική ή εξωτερική της ηλεκτρικής μηχανής ή του ηλεκτρικού πίνακα.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συνέπειες των βραχυκυκλωμάτων, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με το τύπο και την διάρκεια του σφάλματος, το σημείο στην εγκατάσταση όπου παρουσιάστηκε το σφάλμα και την ισχύ του βραχυκυκλώματος.

Στο σημείο του σφάλματος, η παρουσία ηλεκτρικών τόξων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή της μονώσεως του εξοπλισμού, την κόλληση μεταξύ των αγωγών καθώς και φωτιά ή άλλο κίνδυνο για τη ζωή και τον εξοπλισμό.

Στο εσφαλμένο κύκλωμα, η ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση των ζυγών και την αποσύνδεση καλωδίων ενώ η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, λόγω των απωλειών Joule, εμπεριέχει το κίνδυνο καταστροφής της μονώσεως του εξοπλισμού.

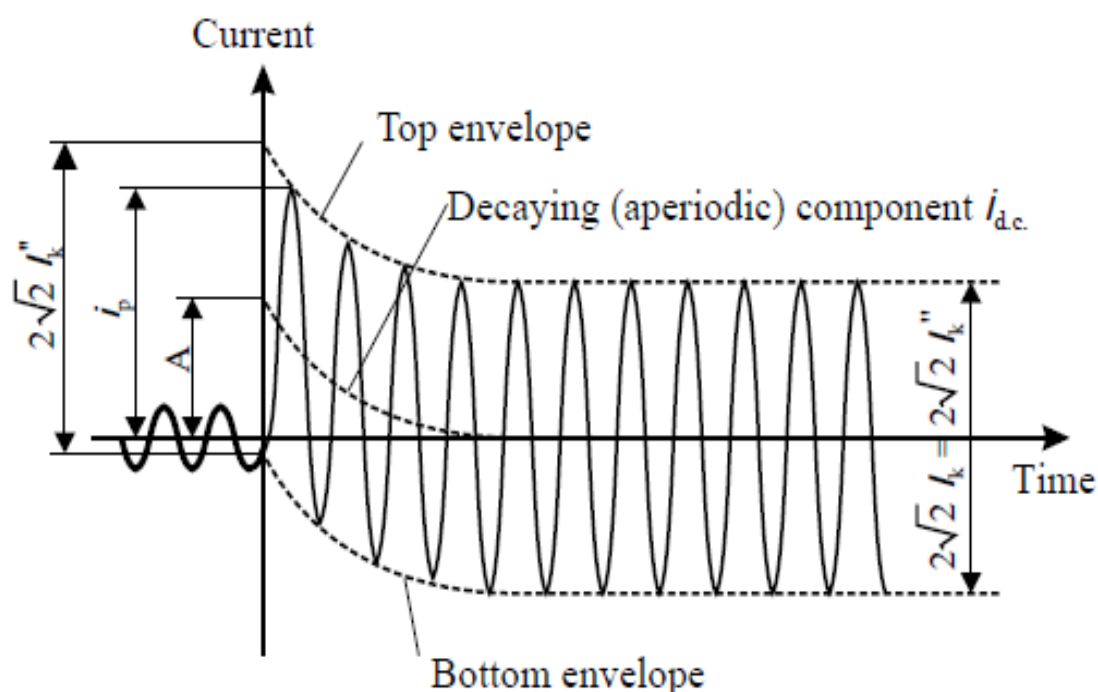
Σε άλλα κυκλώματα εντός δικτύου ή σε κοντινά δίκτυα, σημειώνονται πτώσεις τάσεως κατά τη διάρκεια εκκαθαρίσεως του σφάλματος, οι οποίες μπορούν να διαρκέσουν από ελάχιστα χιλιοστά του δευτερολέπτου έως μερικές εκατοντάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου. Επίσης μπορεί να σημειωθεί τερματισμός της λειτουργίας μέρους του δικτύου, το μέγεθος του οποίου εξαρτάται από το σχεδιασμό του δικτύου και την διάκριση επιπέδων την οποία προσφέρουν οι προστατευτικές διατάξεις. Άλλες συνέπειες μπορούν να είναι η δυναμική αστάθεια είτε η απώλεια συγχρονισμού μεταξύ των ηλεκτρικών μηχανών, διαταραχές στα κυκλώματα παρακολουθήσεως/ελέγχου και άλλα.

1.2 Αναλυτικός υπολογισμός της εντάσεως βραχυκυκλώσεως

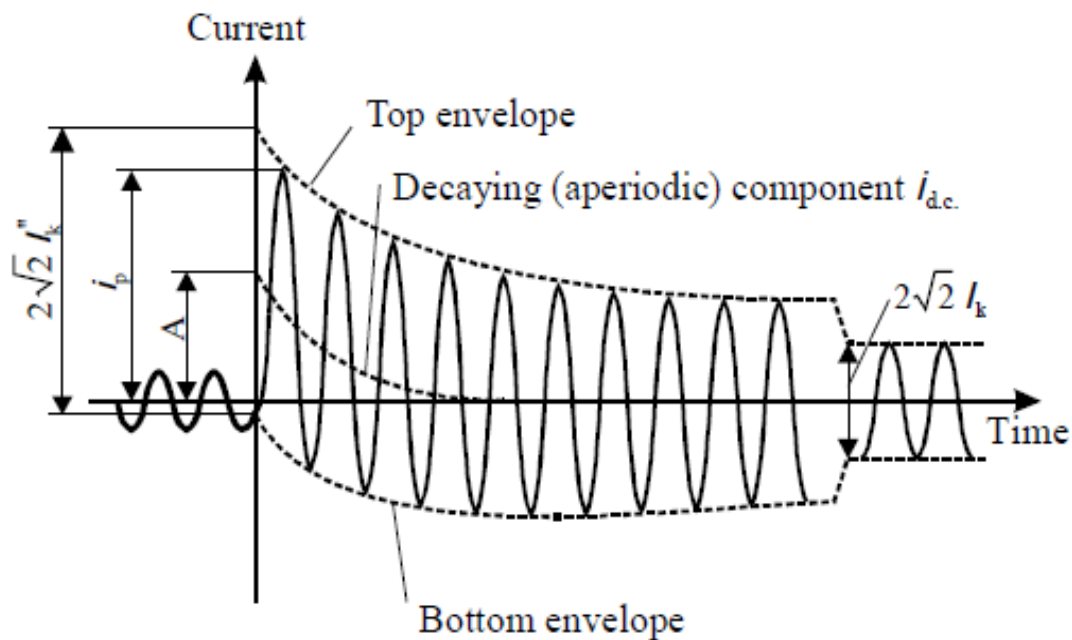
Τα βραχυκυκλώματα κατατάσσονται στην κατηγορία των ταχέων μεταβατικών φαινομένων και η χρονική εξέλιξη τους επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τις σταθερές χρόνου των τυλιγμάτων των γεννητριών που τροφοδοτούν το σφάλμα. Ως

εκ τούτου οι κυματομορφές του προκύπτοντος ρεύματος βραχυκυκλώσεως μπορούν να ενταχθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, με τα αντίστοιχα βραχυκυκλώματα να διακρίνονται σε αυτά τα οποία λαμβάνουν χώρα 'πλησίον της γεννήτριας' και σε αυτά 'μακράν αυτής'.

Σύμφωνα με τον κανονισμό IEC 60909, ως βραχυκύκλωμα 'μακράν της γεννήτριας' χαρακτηρίζεται αυτό κατά την διάρκεια του οποίου η συμμετρική συνιστώσα E.P. της διαθέσιμης εντάσεως βραχυκυκλώσεως παραμένει πρακτικώς σταθερή, βλέπε σχ. 1.2. Αναλόγως βραχυκύκλωμα πλησίον της γεννήτριας χαρακτηρίζεται αυτό στο οποίο τουλάχιστον μία σύγχρονη γεννήτρια συνεισφέρει αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως υπερδιπλάσια της ονομαστικής της ή το βραχυκύκλωμα στο οποίο ασύγχρονοι κινητήρες συνεισφέρουν πάνω από 5% της αρχικής συμμετρικής εντάσεως βραχυκυκλώσεως I''_k , όταν το τελευταίο υπολογίζεται αμελώντας την συνεισφορά των κινητήρων, βλέπε σχ. 1.3.



Σχήμα 1.2: Ένταση βραχυκυκλώσεως για σφάλμα μακράν της γεννήτριας με σταθερή συνιστώσα E.P.^{1,2}



Σχήμα 1.3: Ένταση βραχυκυκλώσεως για σφάλμα πλησίον της γεννήτριας με αποσβεσμένη συνιστώσα Ε.Ρ.^{1,3}

Με βάση τα παραπάνω σχήματα ορίζονται οι ακόλουθες έννοιες των εντάσεων βραχυκυκλώσεως:

Ως αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως, I''_k , ορίζεται η ενεργός τιμή της συμμετρικής συνιστώσας Ε.Ρ. του προσδοκώμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως την στιγμή του σφάλματος, εφ' όσον η σύνθετη αντίσταση σφάλματος παραμένει αμετάβλητη. Αρχική συμμετρική ισχύς βραχυκυκλώσεως, S''_k , ονομάζεται το γινόμενο $\sqrt{3} I''_k U_n$, όπου U_n είναι η ονομαστική τιμή της τάσεως στο σημείο του σφάλματος.

Ως τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως, i_p , ορίζεται η μέγιστη δυνατή στιγμιαία τιμή του προσδοκώμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως.

Ως απεριοδική συνιστώσα Σ.Ρ. της εντάσεως βραχυκυκλώσεως, $i_{d.c.}$, ορίζεται η μέση τιμή μεταξύ της άνω και κάτω περιβάλλουσας της εντάσεως βραχυκυκλώσεως, η οποία αποσβύνεται από μια αρχική τιμή προς το 0.

Ως συμμετρική ένταση διακοπής, I_b , ορίζεται η ενεργός τιμή της συμμετρικής εντάσεως βραχυκυκλώσεως που ρέει κατά την απόζευξη του πρώτου πόλου ενός διακόπτη ισχύος.

Ως ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως, I_k , ορίζεται η ενεργός τιμή της παραμένουσας εντάσεως βραχυκυκλώσεως μετά το πέρας των υπομεταβατικών και μεταβατικών φαινομένων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο αντίστοιχος Αμερικάνικος κανονισμός ANSI/IEEE C.37.5, [4], ορίζει τα δύο είδη βραχυκυκλωμάτων ως εξής:

Μια γεννήτρια θεωρείται τοπική πηγή του βραχυκυκλώματος εάν:

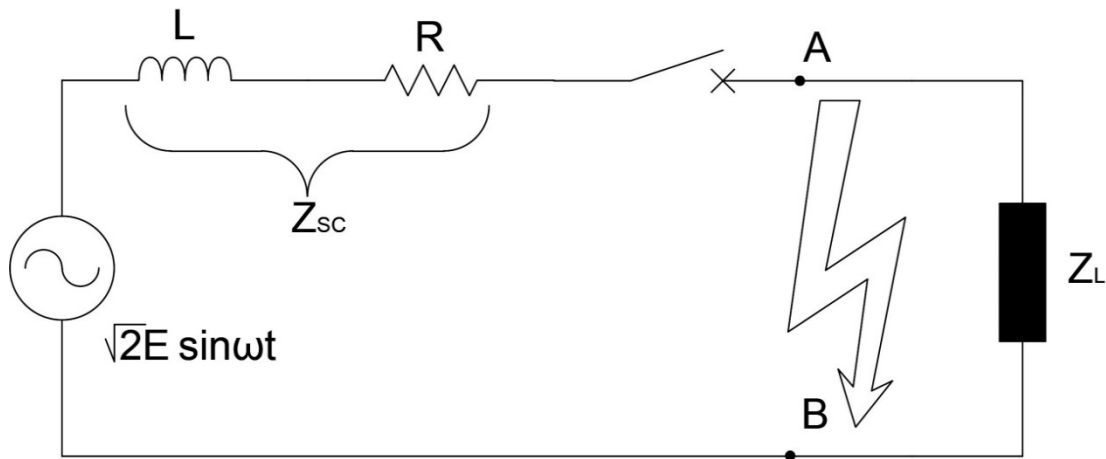
- η ανά μονάδα αντίδραση η οποία είναι εξωτερική της γεννήτριας είναι μικρότερη της υπομεταβατικής αντιδράσεως γεννήτριας πολλαπλασιασμένης επί 1.5,
- η συνεισφορά της γεννήτριας στην συνολική ενεργό τιμή εντάσεως είναι ανώτερη του $0.4E_g/X''_d$, όπου E_g/X''_d είναι η ένταση βραχυκυκλώσεως στην περίπτωση τριφασικού σφάλματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας.

Αναλόγως μια γεννήτρια θεωρείται απομακρυσμένη πηγή του βραχυκυκλώματος εάν:

- η ανά μονάδα αντίδραση η οποία είναι εξωτερική της γεννήτριας είναι μεγαλύτερη ή ίση της υπομεταβατικής αντιδράσεως γεννήτριας πολλαπλασιασμένης επί 1.5,
- η απόστασή της από το σφάλμα περιλαμβάνει δύο ή παραπάνω Μ/Σ,
- η συνεισφορά της γεννήτριας στην συνολική ενεργό τιμή εντάσεως είναι μικρότερη ή ίση του $0.4E_g/X''_d$, όπου E_g/X''_d είναι η ένταση βραχυκυκλώσεως στην περίπτωση τριφασικού σφάλματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας.

1.2.1 Σφάλμα μακριά από τη γεννήτρια

Προκειμένου να μελετήσουμε την ανάπτυξη του ρεύματος βραχυκυκλώσεως στο πεδίο του χρόνου θεωρούμε το απλουστευμένο δίκτυο του σχ. 1.4. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από μία μονοφασική, ημιτονοειδή πηγή ισχύος, $\sqrt{2}E \sin \omega t$, μία ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση $\underline{Z}_{sc}$ που αντιπροσωπεύει τις σύνθετες αντιστάσεις πριν τον διακόπτη και μια αντίσταση φορτίου $\underline{Z}_L$. Σε ένα πραγματικό δίκτυο, η σύνθετη αντίσταση $\underline{Z}_{sc}$ είναι η ισοδύναμη των υπαρχουσών προ του σημείου βραχυκυκλώσεως στοιχείων.



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα απλουστευμένου δικτύου^{1.4}

Με την εμφάνιση σφάλματος μεταξύ των σημείων A και B αναπτύσσεται υπερένταση βραχυκυκλώσεως, I_{sc} , πολλαπλάσια του αρχικού ρεύματος I_L , η οποία περιορίζεται μόνο από την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως Z_{sc} . Το σφάλμα θεωρείται ότι συμβαίνει μακράν της γεννήτριας στην περίπτωση κατά την οποία η σύνθετη αντίσταση των στοιχείων του κυκλώματος που παρεμβάλλονται μεταξύ της γεννήτριας και της θέσεως σφάλματος υπερβαίνει επαρκώς την υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή οι επικρατούσες συνθήκες είναι οι προκύπτουσες από την εφαρμογή τάσεως σε ένα κύκλωμα σειράς R-L. Υπολογίζουμε τις εντάσεις μεταβατικής και μονίμου καταστάσεως από την εξ. 1-1:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \sqrt{2}E \sin(\omega t + \alpha) \quad (1-1)$$

όπου α είναι η γωνία η αντιστοιχούσα στην χρονική στιγμή κατά την οποία λαμβάνει χώρα το βραχυκύκλωμα. Η γενική λύση της διαφορικής εξίσωσης δίνεται από τη εξ. 1-2:

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sqrt{2}I \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{L}t} \quad (1-2)$$

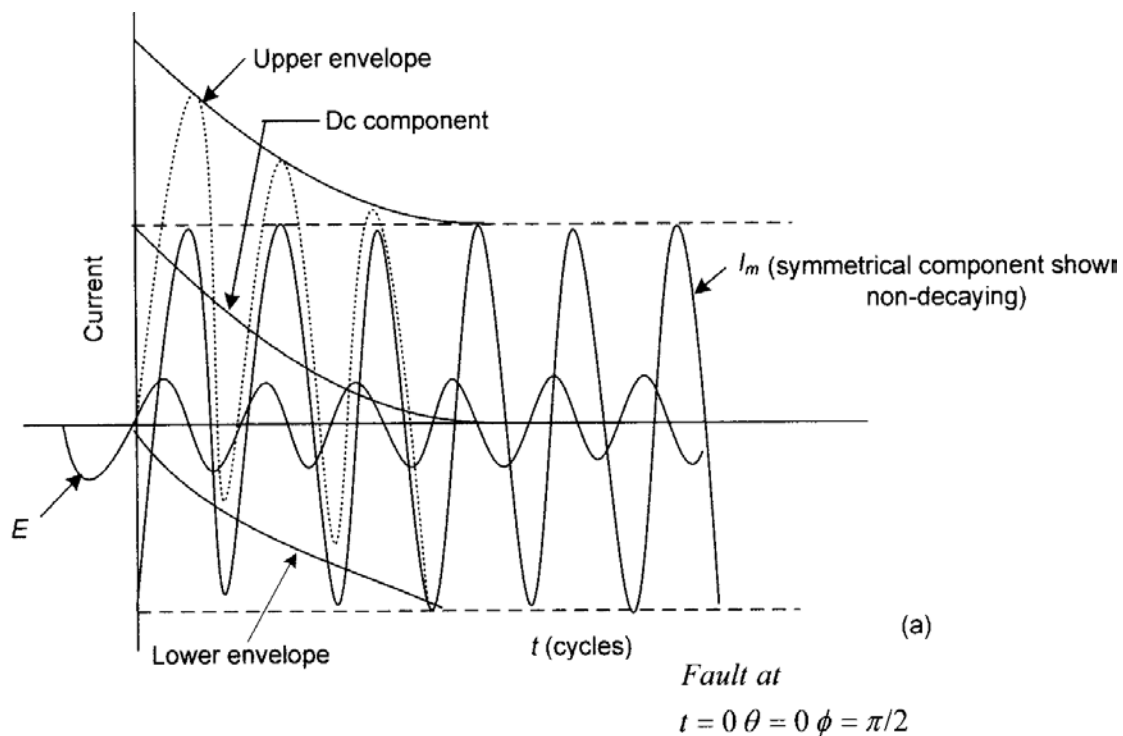
όπου I η ενεργός τιμή της εντάσεως στη μόνιμη κατάσταση, η οποία υπολογίζεται από το λόγο E/Z , και φ η γωνία του ρεύματος ως προς την φασική τάση.

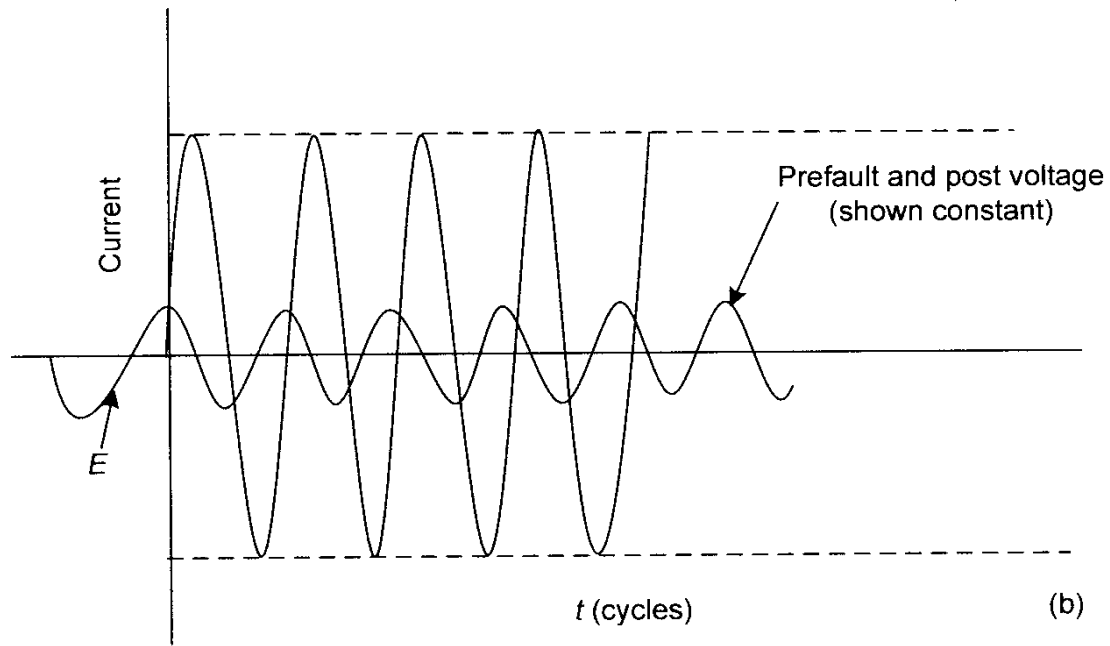
Σύμφωνα με την εξ. 1-2, το ρεύμα αποτελείται από δύο συνιστώσες :

- την συνιστώσα Ε.Ρ., $i_{a.c.} = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$, η οποία είναι ημιτονοειδούς μορφής, με διαφορά φάσεως φ ως προς την τάση και

- την συνιστώσα Σ.Ρ., $i_{d.c} = \sqrt{2}I \sin(\alpha - \varphi)e^{-\frac{R}{L}t}$, η οποία είναι απεριοδική εκθετικά αποσβεννύμενη με σταθερά χρόνου $-L/R$. Η αρχική της τιμή εξαρτάται από τη γωνία α και ο ρυθμός αποσβέσεως της είναι ανάλογος του κλάσματος R/L .

Στα Σ.Η.Ε. γενικώς ισχύει ότι $\omega L \gg R$. Το δε κλάσμα R/X κυμαίνεται μεταξύ 0.1 και 0.3 κατά το μέγιστο. Ως εκ τούτου $\varphi \approx 90^\circ$. Διακρίνουμε δύο ακραίες περιπτώσεις, μία αυτή όπου $\alpha = \varphi \approx \pi/2$ και μία όπου $\alpha = 0^\circ$. Στην πρώτη περίπτωση η συνιστώσα Σ.Ρ. μηδενίζεται και η ένταση βραχυκυκλώσεως είναι συμμετρική ως προς τον χρόνο, ονομάζεται δε εξ αυτού του λόγου 'συμμετρική'. Στην δεύτερη περίπτωση η ένταση βραχυκυκλώσεως είναι μη συμμετρική, εξ ου και η ονομασία 'ασύμμετρη'. Η δε στιγμιαία τιμή του προσδοκώμενου ρεύματος βραχυκυκλώσεως, σύμφωνα με την εξ. 1-2, είναι $2\sqrt{2}I$. Οι δύο περιπτώσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 1.5:





Fault at
 $t = 0 \quad \theta = \pi/2 \quad \phi = \pi/2$

Σχήμα 1.5: Γραφική παράσταση ασύμμετρου, (α), και συμμετρικού, (β), ρεύματος βραχυκυκλώσεως στην περίπτωση σφάλματος μακριά από την γεννήτρια^{1.5}

Ο εκθετικός συντελεστής $e^{-\frac{R}{L}t}$ καθορίζει την απόσβεση της απεριοδικής συνιστώσας, της οποίας η τιμή μειώνεται στο $1/e = 36.7\%$, μετά από χρόνο $T = L/R$. Ο ρυθμός αποσβέσεως της απεριοδικής συνιστώσας και κατά συνέπεια η τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως, i_p , χρήζουν υπολογισμού για τον προσδιορισμό της ικανότητας κλεισίματος των απαιτούμενων διακοπών κυκλώματος και για την οριοθέτηση του μεγέθους των ηλεκτροδυναμικών φορτίσεων τις οποίες θα πρέπει να αντέξει το σύνολο της εγκαταστάσεως. Η τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως, i_p , μπορεί να εξαχθεί από την ενεργό τιμή του συμμετρικού ρεύματος βραχυκυκλώσεως I''_k χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k \quad (1-3)$$

όπου ο συντελεστής κ υπολογίζεται συναρτήσει του λόγου R/X σύμφωνα με τη σχέση:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 e^{-3\frac{R}{X}} \quad (1-4)$$

1.2.2 Σφάλμα κοντά στη γεννήτρια

Όταν το σφάλμα σημειωθεί σε άμεση ηλεκτρική γειτνίαση με τη γεννήτρια που τροφοδοτεί το κύκλωμα, η διακύμανση της επαγωγικής αντιδράσεως της τελευταίας, η οποία για την περίπτωση του σφάλματος που εξετάζουμε είναι η κύρια αντίδραση, αποσβένει το ρεύμα βραχυκυκλώσεως. Πράγματι η επαγωγική αντίδραση διαφοροποιείται συναρτήσει του χρόνου λαμβάνοντας κατά σειράν τις ακόλουθες τιμές :

- Υπομεταβατική (X''_d , τα πρώτα 10 έως 20 χιλιοστά του δευτερολέπτου του σφάλματος).
- Μεταβατική (X'_d , έως και τα 500 χιλιοστά του δευτερολέπτου).
- Μονίμου καταστάσεως (X_d , ή αλλιώς σύγχρονη αντίδραση).

Να σημειωθεί ότι η τιμή της επαγωγικής αντιδράσεως της γεννήτριας αυξάνεται κατά τη διάρκεια του φαινομένου μέχρι να σταθεροποιηθεί στη μόνιμη κατάσταση, δηλαδή ισχύει $X''_d < X'_d < X_d$. Η διαδοχική επίδραση των τριών αντιδράσεων οδηγεί σε σταδιακή μείωση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως το οποίο αποτελεί σύνθεση τεσσάρων συνιστωσών :

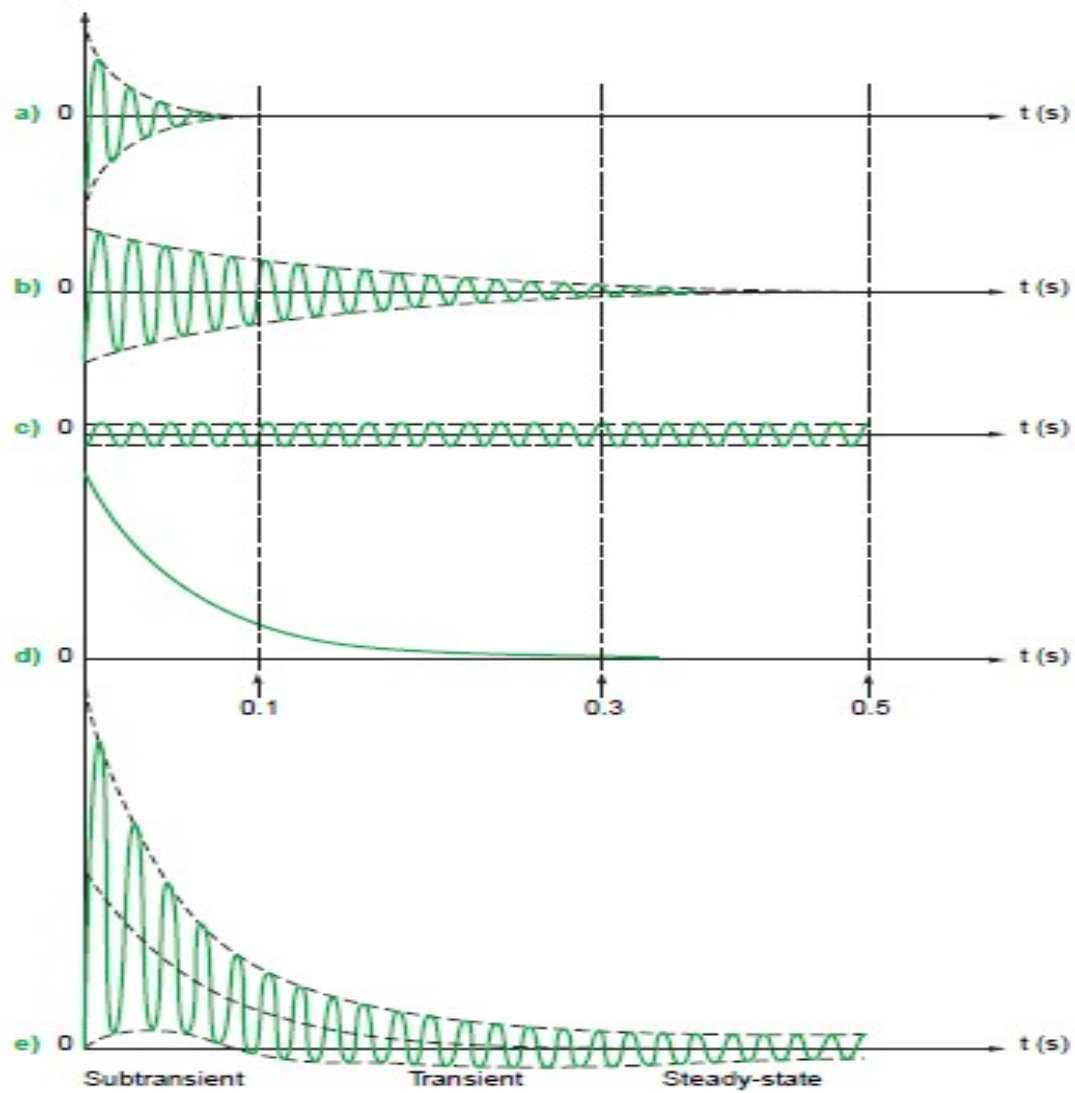
- των δύο εναλλασσόμενων αποσβεννύμενων συνιστωσών (υπομεταβατικής και μεταβατικής) καθώς και της συνιστώσας μόνιμου καταστάσεως και
- της απεριοδικής συνιστώσας Σ.Ρ. που προκύπτει από την ανάπτυξη του ρεύματος στο επαγωγικό κύκλωμα.

Το ρεύμα βραχυκυκλώσεως καθίσταται μέγιστο όταν το σφάλμα συμβεί την στιγμή μηδενικής τιμής της τάσεως, η δε αναλυτική του έκφραση είναι η εξής:

$$i(t) = \sqrt{2} E \left\{ \left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{1}{X_d} \right\} \cos \omega t - \frac{E\sqrt{2}}{X''_d} e^{-\frac{t}{T''_d}} \quad (1-5)$$

όπου:

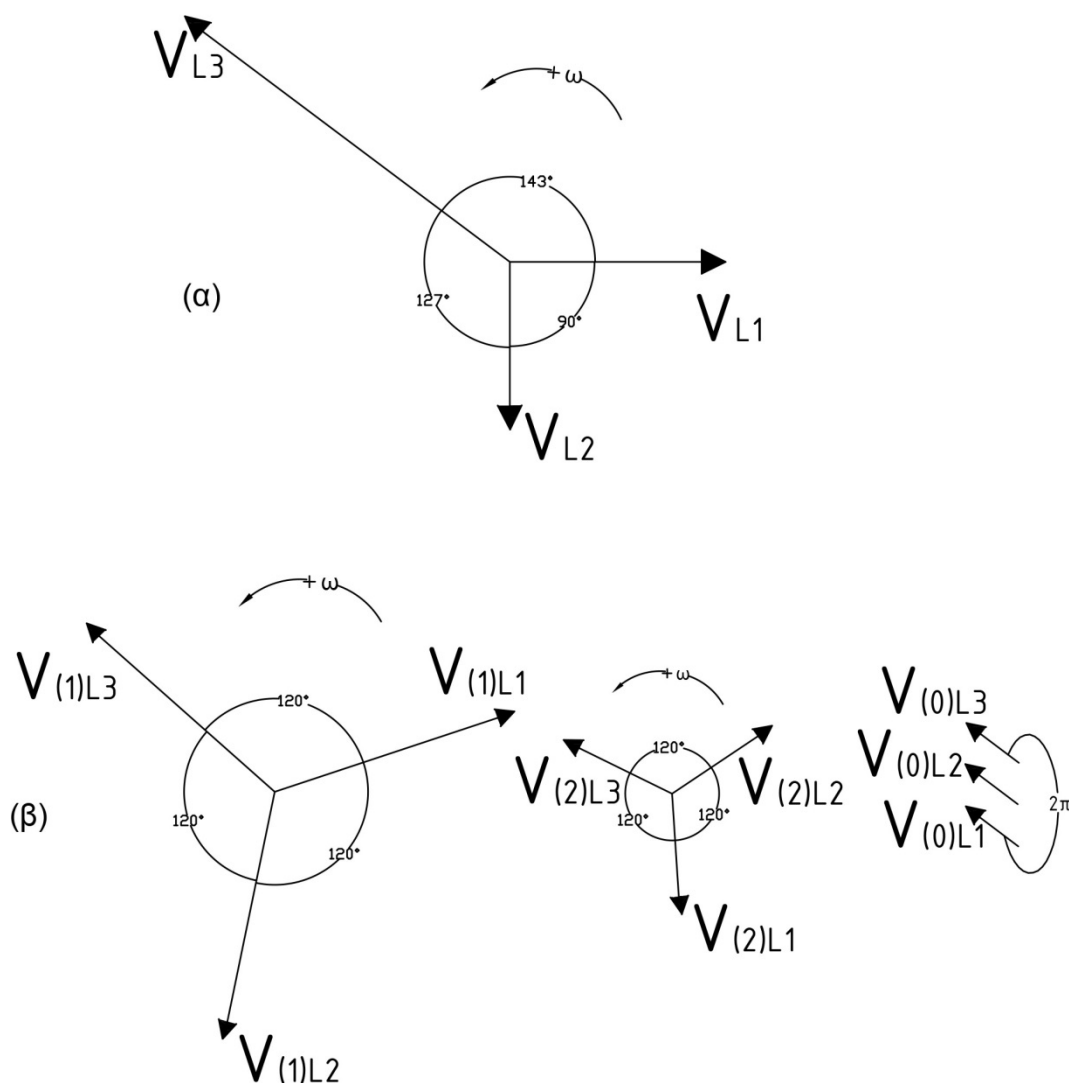
- E είναι η ενεργός τιμή φασικής τάσεως στους ακροδέκτες της γεννήτριας,
- T''_d , είναι η υπομεταβατική, μεταβατική και απεριοδική σταθερά χρόνου,
- T'_d, T_α αντιστοίχως.

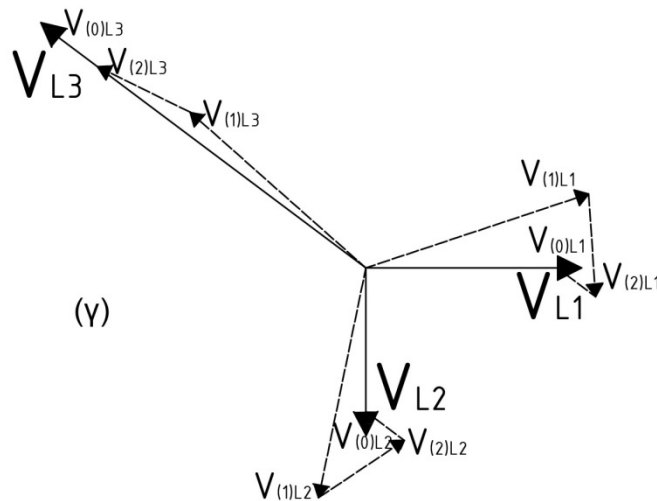


Σχήμα 1.6: Ρεύμα βραχυκυκλώσεως I_{sc} και συνεισφορά των επιμέρους συνιστωσών του στην περίπτωση σφάλματος κοντά στη γεννήτρια: υπομεταβατική (α), μεταβατική (β), μόνιμου καταστάσεως (γ), αperiοδική (δ) και συνολικό ρεύμα βραχυκυκλώσεως (ε) ^{1.6}

1.3 Μετασχηματισμός συμμετρικών συνιστωσών

Σε τριφασικά συστήματα Ε.Ρ., ο υπολογισμός των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως, που προκύπτουν από συμμετρικά και ασύμμετρα σφάλματα, απλοποιείται με τη χρήση της μεθόδου των συμμετρικών συνιστωσών. Αυτή, όσον αφορά τριφασικά συστήματα, στηρίζεται στο γεγονός ότι ένα ασύμμετρο τριφασικό σύστημα τάσεων ή εντάσεων μπορεί να αναλυθεί σε 3 συμμετρικά συστήματα. Τα τρία διανύσματα του κάθε συμμετρικού συστήματος είναι μετατοπισμένα μεταξύ τους κατά 0° ή 120° . Κάθε σύστημα διανυσμάτων αποτελεί μια 'συμμετρική συνιστώσα' του αρχικού ασύμμετρου συστήματος διανυσμάτων.





Σχήμα 1.7: Ανάλυση ασύμμετρου τριφασικού συστήματος τάσεων, (α), σε τρία συμμετρικά συστήματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας, (β) και σύνθεση του αρχικού συστήματος εκ των συμμετρικών συνιστωσών του, (γ)

Ένα ασύμμετρο σύστημα τάσεων ή εντάσεων μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα ενός συστήματος θετικής ακολουθίας, ενός συστήματος αρνητικής ακολουθίας, ήτοι με αντίθετη σειρά διαδοχής και ενός συστήματος μηδενικής ακολουθίας.

Η ισοδυναμία που προαναφέρθηκε θεμελιώνεται πάνω στον ακόλουθο μετασχηματισμό συμμετρικών συνιστωσών:

$$\underline{V}_{L1L2L3} = \underline{T}_s \underline{V}_{012} \quad (1-6)$$

όπου

$\underline{V}_{L1L2L3}$ είναι τα διανύσματα (πίνακες στήλη) των ασύμμετρων φασικών τάσεων L1, L2, L3 και

$\underline{V}_{012}$ είναι οι ακολουθιακές συνιστώσες τάσεως της φάσεως L1.

Δίδονται δε από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\underline{V}_{L1L2L3} = [\underline{V}_{L1} \quad \underline{V}_{L2} \quad \underline{V}_{L3}]^T \quad (1-7)$$

$$\underline{V}_{012} = [\underline{V}_{(1)} \quad \underline{V}_{(2)} \quad \underline{V}_{(0)}]^T \quad (1-8)$$

Η δε μήτρα μετασχηματισμού, $\underline{T}_s$, είναι ίση με:

$$\underline{T}_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

όπου $\underline{a}$ ο μοναδιαίος στροφέας κατά 120° ανθρωρολογικά, για τον οποίο ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\underline{a} = e^{j120} = -0,5 + j0.866$$

$$1 + \underline{a}^2 + \underline{a} = 0 \quad (1-10)$$

Με χρήση του στροφέα $\underline{a}$ ευρίσκεται ότι οι συνιστώσες ακολουθίας και των τριών φάσεων μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει αυτών της φάσεως L1:

$$\begin{aligned} \underline{V}_{(1)L2} &= \underline{a}^2 \underline{V}_{(1)L1} \\ \underline{V}_{(1)L3} &= \underline{a} \underline{V}_{(1)L1} \\ \underline{V}_{(2)L2} &= \underline{a} \underline{V}_{(2)L1} \\ \underline{V}_{(2)L3} &= \underline{a}^2 \underline{V}_{(2)L1} \\ \underline{V}_{(0)L1} &= \underline{V}_{(0)L2} = \underline{V}_{(0)L3} \end{aligned} \quad (1-11)$$

Η ορίζουσα της μήτρας μετασχηματισμού $\underline{T}_s$ είναι διάφορη του μηδενός, άρα η μήτρα μετασχηματισμού είναι αντιστρέψιμη. Επομένως με βάση την εξ. 1-6 ισχύει ότι:

$$\underline{V}_{012} = \underline{T}_s^{-1} \underline{V}_{L1L2L3} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \underline{V}_{L1L2L3} \quad (1-12)$$

Με βάση τις εξισώσεις μετασχηματισμού 1-6 & 1-12 προκύπτει, σε ανεπτυγμένη μορφή, ότι:

$$\begin{aligned} \underline{V}_{L1} &= \underline{V}_{(1)} + \underline{V}_{(2)} + \underline{V}_{(0)} \\ \underline{V}_{L2} &= \underline{a}^2 \underline{V}_{(1)} + \underline{a} \underline{V}_{(2)} + \underline{V}_{(0)} \\ \underline{V}_{L3} &= \underline{a} \underline{V}_{(1)} + \underline{a}^2 \underline{V}_{(2)} + \underline{V}_{(0)} \end{aligned} \quad (1-13)$$

και

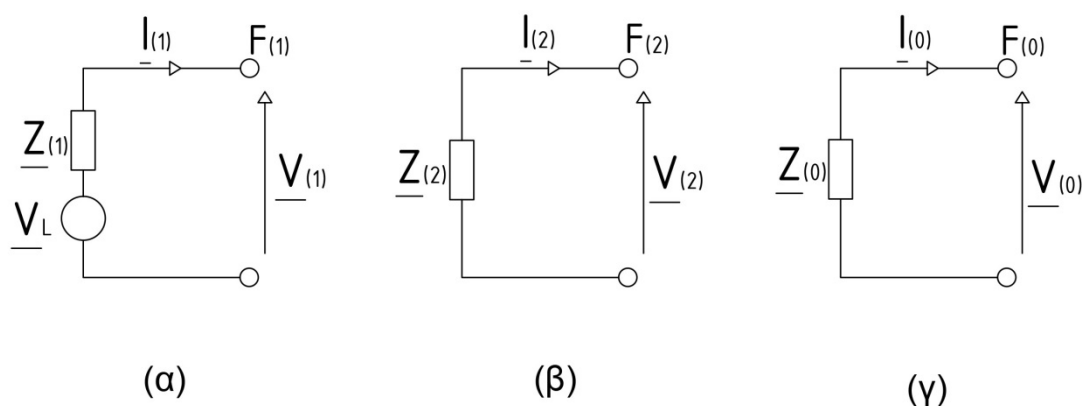
$$\begin{aligned} \underline{V}_{(0)} &= \frac{1}{3} (\underline{V}_{L1} + \underline{V}_{L2} + \underline{V}_{L3}) \\ \underline{V}_{(1)} &= \frac{1}{3} (\underline{V}_{L1} + \underline{a} \underline{V}_{L2} + \underline{a}^2 \underline{V}_{L3}) \\ \underline{V}_{(2)} &= \frac{1}{3} (\underline{V}_{L1} + \underline{a}^2 \underline{V}_{L2} + \underline{a} \underline{V}_{L3}) \end{aligned} \quad (1-14)$$

1.3.1 Ανάλυση σφαλμάτων με τη μέθοδο των συμμετρικών συνιστωσών

Ως συμμετρικά σφάλματα χαρακτηρίζονται εκείνα στα οποία έχουμε ίση συνεισφορά από όλες τις φάσεις. Όλες οι υπόλοιπες περιπτώσεις σφαλμάτων χαρακτηρίζονται ως ασύμμετρες, βλέπε σχ. 1.1.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου των συμμετρικών συνιστωσών στην ανάλυση σφαλμάτων κάνουμε χρήση του θεωρήματος Thevenin^{1,7}, θεωρώντας ότι όλο το δίκτυο στο σημείο του σφάλματος ισοδυναμεί με μία τάση όπισθεν μιας σύνθετης αντιστάσεως $\underline{Z}$. Για την ανάλυση γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Αμελούνται τα ρεύματα φορτίου.
- Το δίκτυο θεωρείται γραμμικό, ώστε να ισχύει το θεώρημα Thevenin.
- Οι τάσεις πριν το σφάλμα θεωρούνται συμμετρικές, στερούμενες έτσι της συνιστώσας αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας.



Σχήμα 1.8: Αναπαράσταση κυκλώματος θετικής, (α), αρνητικής, (β), και μηδενικής, (γ), ακολουθίας δικτύου

Στο σχ. 1.8 παρουσιάζεται το ισοδύναμο κατά Thevenin δικτύου θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Παρατηρείται ότι υφίσταται τάση θετικής ακολουθίας μόνον, διότι το σύστημα πριν το σφάλμα θεωρείται συμμετρικό. Επίσης σημειώνεται ότι οι σύνθετες αντιστάσεις $\underline{Z}_{(1)}$, $\underline{Z}_{(2)}$, και $\underline{Z}_{(0)}$ είναι οι ακολουθιακές σύνθετες αντιστάσεις.

Οι σχέσεις που προκύπτουν από τα ισοδύναμα κυκλώματα του σχ. 1.8 είναι οι εξής :

$$\underline{V}_L = \underline{V}_{(1)} + \underline{I}_{(1)} \underline{Z}_{(1)}$$

$$0 = \underline{V}_{(2)} + \underline{I}_{(2)} \underline{Z}_{(2)} \quad (1-15)$$

$$0 = \underline{V}_{(0)} + \underline{I}_{(0)} \underline{Z}_{(0)}$$

1.3.1.1 Μονοφασικό βραχυκύκλωμα με γη

Η ροή του ρεύματος, για την περίπτωση σφάλματος με γη, εξαρτάται από τη μέθοδο γειώσεως του συστήματος. Υποθέτουμε σύστημα γειώσεως με πρακτικά μηδενική αντίσταση γης. Το ρεύμα σφάλματος με γη πρέπει να έχει ένα δρόμο επιστροφής μέσω των γειωμένων ουδέτερων των γεννητριών ή των Μ/Σ. Σε διαφορετική περίπτωση ισχύει $\underline{Z}_{(0)} = \infty$ και η ένταση σφάλματος είναι μηδενική^{1.8}.

Στο κύκλωμα του σχ. 1.9, υφίσταται μονοφασικό βραχυκύκλωμα (έστω στη φάση L1) με γη, με διαμεσολάβηση σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$.



Σχήμα 1.9: Μονοφασικό σφάλμα με γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$

Για το συγκεκριμένο τύπο σφάλματος ισχύει ότι οι εντάσεις των φάσεων L2 και L3 είναι μηδενικές:

$$\underline{I}_{L2} = \underline{I}_{L3} = 0 \quad (1-16)$$

ενώ η τάση της εσφαλμένης φάσεως L1 είναι ίση με:

$$\underline{V}_{L1} = \underline{I}_{L1} \underline{Z}_f \quad (1-17)$$

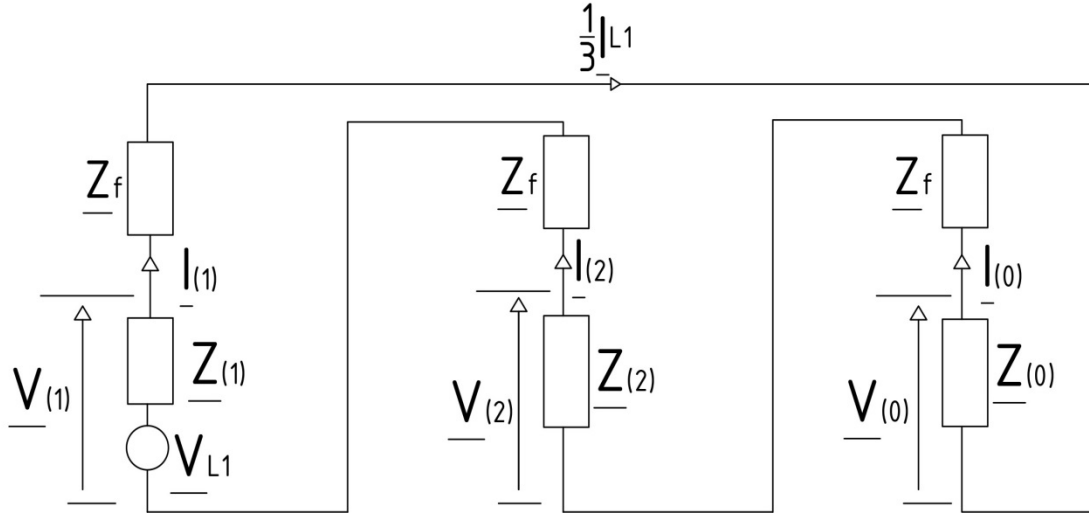
Από την ανάλυση των ρευμάτων σφάλματος και των φασικών τάσεων στο σημείο του σφάλματος σε συμμετρικές συνιστώσες και με βάση τις εξ. 1-13 & 1-16 προκύπτει ότι:

$$\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \underline{I}_{L1} \quad (1-18)$$

ενώ από τις εξισώσεις 1-13, 1-15, 1-17 & 1-18 συνεπάγεται ότι:

$$\begin{aligned}
3\underline{I}_{(0)} \underline{Z}_f &= \underline{V}_{(0)} + \underline{V}_{(1)} + \underline{V}_{(2)} = \\
&= -\underline{I}_{(0)} \underline{Z}_{(0)} + (\underline{V}_{L1} - \underline{I}_{(1)} \underline{Z}_{(1)}) - \underline{I}_{(2)} \underline{Z}_{(2)}
\end{aligned} \tag{1-19}$$

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι, για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη, τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά, καθότι διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα. Η σύνθετη αντίσταση σφάλματος $\underline{Z}_f$ συνδέεται σε σειρά με το κάθε κύκλωμα ακολουθίας ξεχωριστά.



Σχήμα 1.10: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων μονοφασικού σφάλματος με γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$

Οι ακολουθιακές εντάσεις της φάσεως L1 υπολογίζονται ως εξής:

$$\underline{I}_{(0)} = \underline{I}_{(1)} = \underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{V}_{L1}}{\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + 3\underline{Z}_f} \tag{1-20}$$

Το ρεύμα σφάλματος ισούται με:

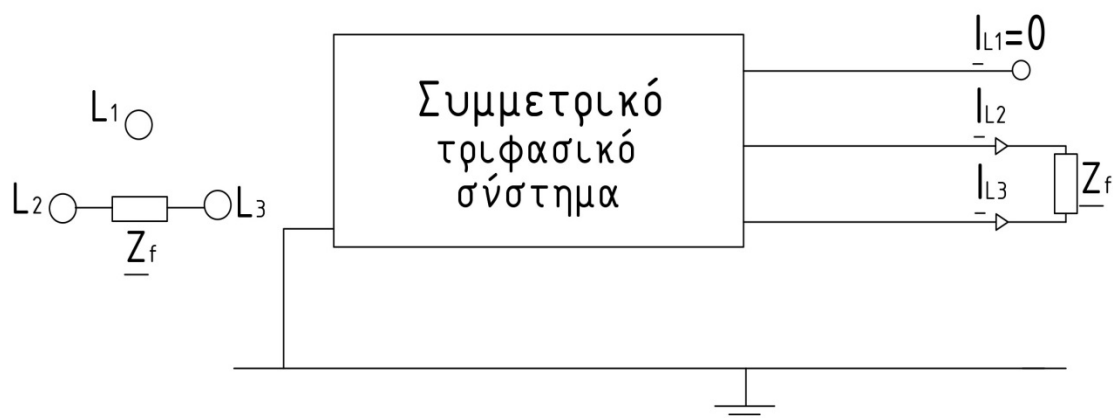
$$\underline{I}_{L1} = 3\underline{I}_0 = \frac{3\underline{V}_{L1}}{\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + 3\underline{Z}_f} \tag{1-21}$$

Για την περίπτωση μηδενικής σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος, $\underline{Z}_f = 0$, το ρεύμα σφάλματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{I}_{L1} = 3\underline{I}_0 = \frac{3\underline{V}_{L1}}{\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \tag{1-22}$$

1.3.1.2 Διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη

Το κύκλωμα του σχ. 1.11, υφίσταται διφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη, μεταξύ των φάσεων L2 και L3, με διαμεσολάβηση σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$.



Σχήμα 1.11: Διφασικό σφάλμα χωρίς γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$

Οι συνθήκες του συγκεκριμένου τύπου σφάλματος είναι:

$$\underline{I}_{L1} = 0 \quad (1-23)$$

$$\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = 0 \quad (1-24)$$

$$\underline{V}_{L2} - \underline{V}_{L3} = \underline{I}_f \underline{Z}_f = \underline{I}_{L2} \underline{Z}_f \quad (1-25)$$

όπου $\underline{I}_f$ η ένταση σφάλματος.

Από την ανάλυση των ρευμάτων σφάλματος και των φασικών τάσεων στο σημείο του σφάλματος σε συμμετρικές συνιστώσες και σύμφωνα με τις εξισώσεις 1-13, 1-23 & 1-24 προκύπτει ότι:

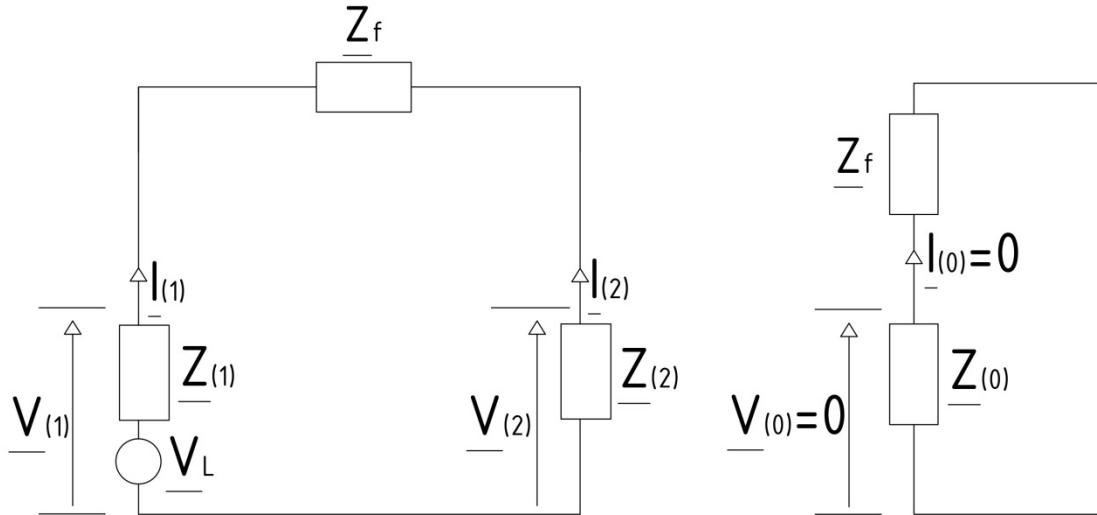
$$\underline{I}_{(0)} = 0 \quad (1-26)$$

$$\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)} \quad (1-27)$$

ενώ από τις εξισώσεις 1-25, 1-26 & 1-27 προκύπτει ότι:

$$\underline{V}_{(1)} - \underline{V}_{(2)} = \underline{I}_{(1)} \underline{Z}_f \quad (1-28)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις καθίσταται προφανές ότι, για την περίπτωση διφασικού σφάλματος χωρίς γη, τα κυκλώματα θετικής και αρνητικής ακολουθίας συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα, ενώ το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας είναι νεκρό.



Σχήμα 1.12: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων διφασικού σφάλματος χωρίς γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$

Σύμφωνα με το σχ. 1.12 ισχύει ότι:

$$\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{V}_L}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_f} \quad (1-29)$$

και το ρεύμα σφάλματος ισούται με:

$$\underline{I}_f = \underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} = -j\sqrt{3} \frac{\underline{V}_L}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_f} \quad (1-30)$$

Οι ακολουθιακές τάσεις και οι φασικές τάσεις υπολογίζονται με χρήση των ομάδων εξισώσεων 1-13 & 1-14.

Για την περίπτωση μηδενικής σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος, $\underline{Z}_f = 0$, οι συνθήκες του συγκεκριμένου τύπου σφάλματος είναι:

$$\underline{I}_{L1} = 0 \quad (1-31)$$

$$\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = 0 \quad (1-32)$$

$$\underline{V}_{L2} = \underline{V}_{L3} \quad (1-33)$$

Ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική πορεία με το προηγούμενο τύπο σφάλματος προκύπτει ότι:

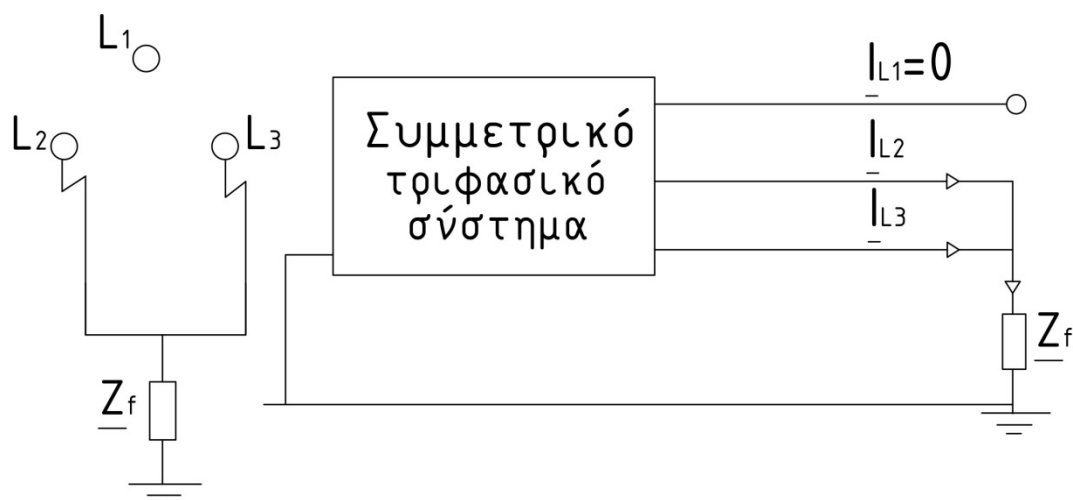
$$\underline{I}_{(1)} = -\underline{I}_{(2)} = \frac{\underline{V}_L}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (1-34)$$

και το ρεύμα σφάλματος ισούται με:

$$\underline{I}_f = \underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_{(1)} + \underline{a} \underline{I}_{(2)} = -j\sqrt{3} \frac{\underline{V}_L}{\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(2)}} \quad (1-35)$$

1.3.1.3 Διφασικό βραχυκύκλωμα με γη

Στο κύκλωμα του σχ. 1.13, παρουσιάζεται διφασικό βραχυκύκλωμα με γη, μεταξύ των φάσεων L2 και L3, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$.



Σχήμα 1.13: Διφασικό σφάλμα με γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$

Οι συνθήκες του συγκεκριμένου τύπου σφάλματος είναι:

$$\underline{I}_{L1} = 0 \quad (1-36)$$

$$\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = \underline{I}_f \quad (1-37)$$

$$\underline{V}_{L2} = \underline{V}_{L3} = (\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3})\underline{Z}_f = \underline{I}_f \underline{Z}_f \quad (1-38)$$

όπου $\underline{I}_f$ η ένταση σφάλματος.

Από την ανάλυση των ρευμάτων σφάλματος και των φασικών τάσεων στο σημείο του σφάλματος σε συμμετρικές συνιστώσες και σύμφωνα με τις εξισώσεις 1-13, 1-36 & 1-37 προκύπτει ότι:

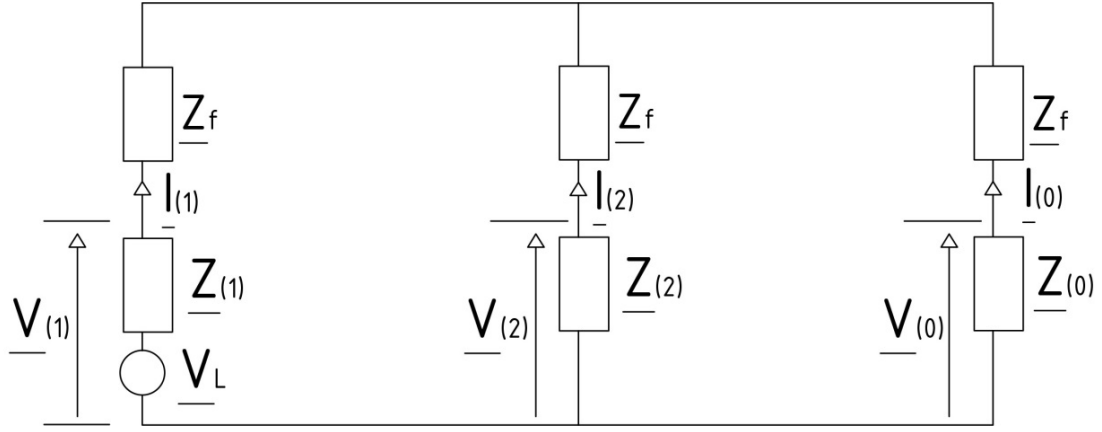
$$\underline{I}_f = 3\underline{I}_{(0)} \quad (1-39)$$

$$\underline{V}_{(1)} = \underline{V}_{(2)} \quad (1-40)$$

Από τις εξισώσεις 1-38 & 1-40 συνεπάγεται ότι:

$$\underline{V}_{(0)} - \underline{V}_{(1)} = \underline{V}_{(0)} - \underline{V}_{(2)} = \underline{I}_f \underline{Z}_f = 3\underline{I}_{(0)} \underline{Z}_f \quad (1-41)$$

Σύμφωνα με τις παραπάνω εξισώσεις, στην περίπτωση διφασικού σφάλματος με γη, με διαμεσολάβηση σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος, τα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας συνδέονται μεταξύ τους σύμφωνα με το σχ. 1.14:



Σχήμα 1.14: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων διαφασικού σφάλματος με γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$

Με εφαρμογή του θεωρήματος Millman^{1.9} στο σχ. 1.14, υπολογίζουμε τις τάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας:

$$\underline{V}_{(1)} = \underline{V}_{(2)} = \frac{\underline{V}_L / \underline{Z}_{(1)}}{\frac{1}{\underline{Z}_{(1)}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)}} + \frac{1}{\underline{Z}_{(0)} + 3\underline{Z}_f}} \quad (1-42)$$

και την ένταση μηδενικής ακολουθίας ως εξής:

$$\underline{I}_{(0)} = -\frac{\underline{V}_{(1)}}{\underline{Z}_{(0)} + 3\underline{Z}_f} \quad (1-43)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 1-41, 1-42 & 1-43 καταλήγουμε στην εξίσωση υπολογισμού του ρεύματος σφάλματος:

$$\underline{I}_f = 3\underline{I}_0 = -3 \frac{\underline{V}_L \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}(\underline{Z}_{(0)} + 3\underline{Z}_f) + \underline{Z}_{(2)}(\underline{Z}_{(0)} + 3\underline{Z}_f)} \quad (1-44)$$

Για την περίπτωση μηδενικής σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος, $\underline{Z}_f = 0$, οι συνθήκες του συγκεκριμένου τύπου σφάλματος είναι:

$$\underline{I}_{L1} = 0 \quad (1-45)$$

$$\underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = \underline{I}_f \quad (1-46)$$

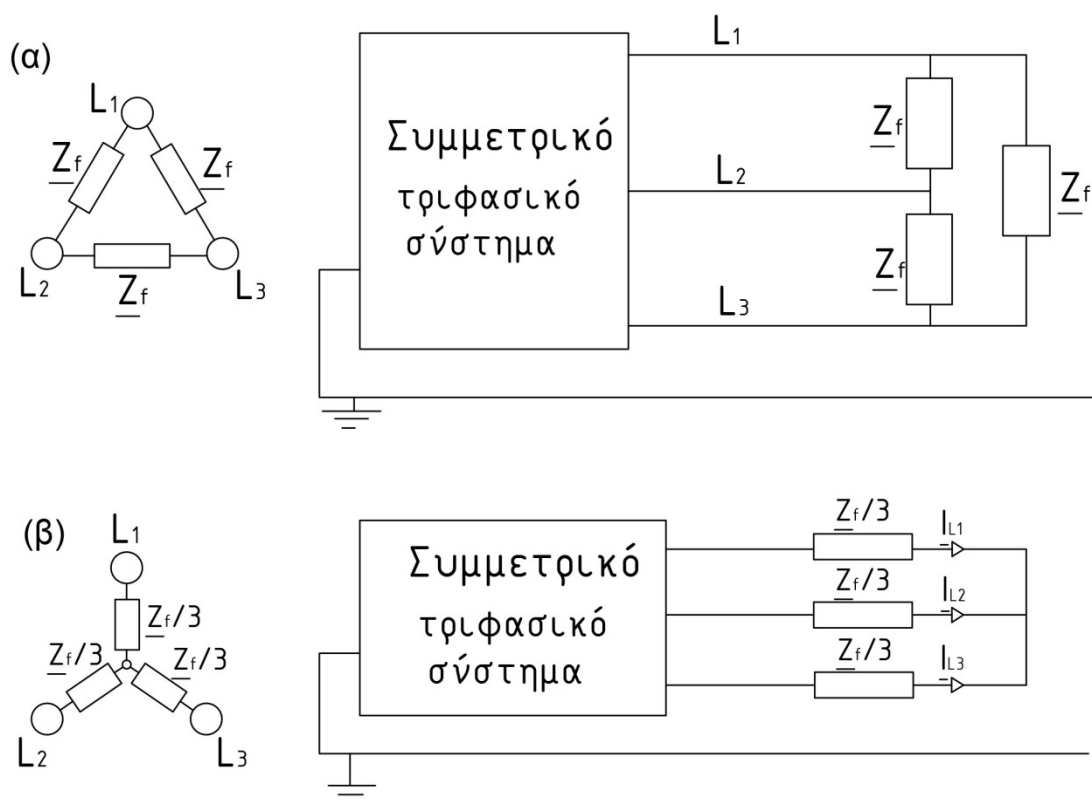
$$\underline{V}_{L2} = \underline{V}_{L3} = 0 \quad (1-47)$$

και η ένταση σφάλματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{I}_f = 3\underline{I}_{(0)} = -3 \frac{\underline{V}_L \underline{Z}_{(2)}}{\underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(2)} + \underline{Z}_{(1)}\underline{Z}_{(0)} + \underline{Z}_{(2)}\underline{Z}_{(0)}} \quad (1-48)$$

1.3.1.4 Τριφασικό βραχυκύκλωμα με ή χωρίς γη

Στο κύκλωμα του σχ. 1.15, (α), υφίσταται τριφασικό βραχυκύκλωμα χωρίς γη με διαμεσολάβηση σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος.



Σχήμα 1.15: Τριφασικό σφάλμα χωρίς γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος

$\underline{Z}_f$

Προκειμένου να υπολογίσουμε την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση σφάλματος ανηγμένη σε κάθε φάση ξεχωριστά, μετασχηματίζουμε το τρίγωνο σε αστέρα με απομονωμένο ουδέτερο κόμβο, βλέπε σχ. 1.15, (β). Το διανυσματικό άθροισμα των εντάσεων σφάλματος θεωρείται μηδενικό εφόσον έχουμε συμμετρικό σφάλμα. Οι συνθήκες του συγκεκριμένου τύπου σφάλματος είναι οι εξής:

$$\underline{I}_{L1} + \underline{I}_{L2} + \underline{I}_{L3} = 0 \quad (1-49)$$

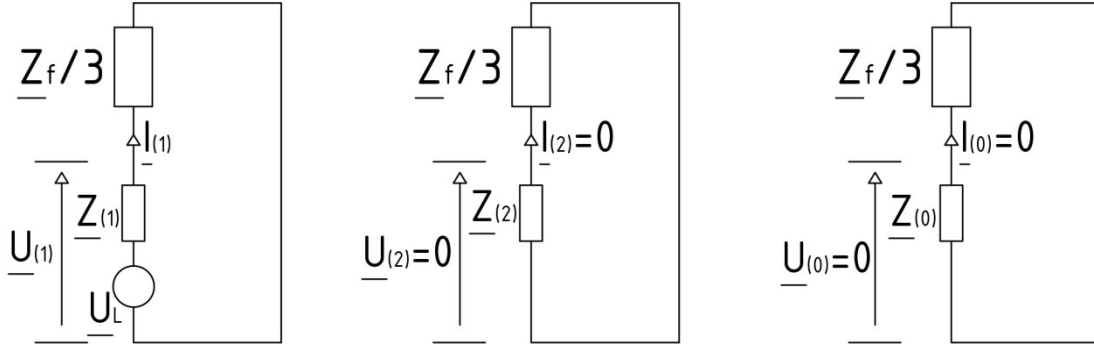
$$\underline{V}_{L1} = \frac{1}{3} \underline{Z}_f \underline{I}_{L1} \quad \underline{V}_{L2} = \frac{1}{3} \underline{Z}_f \underline{I}_{L2} \quad \underline{V}_{L3} = \frac{1}{3} \underline{Z}_f \underline{I}_{L3} \quad (1-50)$$

Από την ανάλυση των φυσικών εντάσεων και τάσεων στο σημείο του σφάλματος σε συμμετρικές συνιστώσες και σύμφωνα με τις εξισώσεις 1-13, 1-51 & 1-52 προκύπτει ότι:

$$\underline{V}_0 = \underline{V}_1 = \underline{V}_2 = 0 \quad (1-51)$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_2 = 0 \quad (1-52)$$

Σύμφωνα με τις εξισώσεις 1-51 & 1-52 τα τρία ακολουθιακά κυκλώματα είναι ανεξάρτητα και κλειστά, βλέπε σχ. 1.16.



Σχημα 1.16: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων τριφασικού σφάλματος με γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$

Από την ομάδα εξισώσεων 1-13 υπολογίζουμε τις φασικές εντάσεις σφάλματος:

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_1 = \frac{\underline{V}_{L1}}{(\underline{Z}_0 + \frac{\underline{Z}_f}{3})} \quad (1-53)$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_1 \quad (1-54)$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_1 \quad (1-55)$$

Στο κύκλωμα του σχ. 1.17 υφίσταται τριφασικό βραχυκύκλωμα με γη μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$. Το τριφασικό σφάλμα θεωρείται ότι συμβαίνει μέσω ομοίων σύνθετων αντιστάσεων, συνδεδεμένων σε σειρά με τη γη.

Οι συνθήκες του συγκεκριμένου τύπου σφάλματος είναι:

$$\underline{V}_{L1} = \underline{Z}_f \underline{I}_{L1} \quad \underline{V}_{L2} = \underline{Z}_f \underline{I}_{L2} \quad \underline{V}_{L3} = \underline{Z}_f \underline{I}_{L3} \quad (1-56)$$

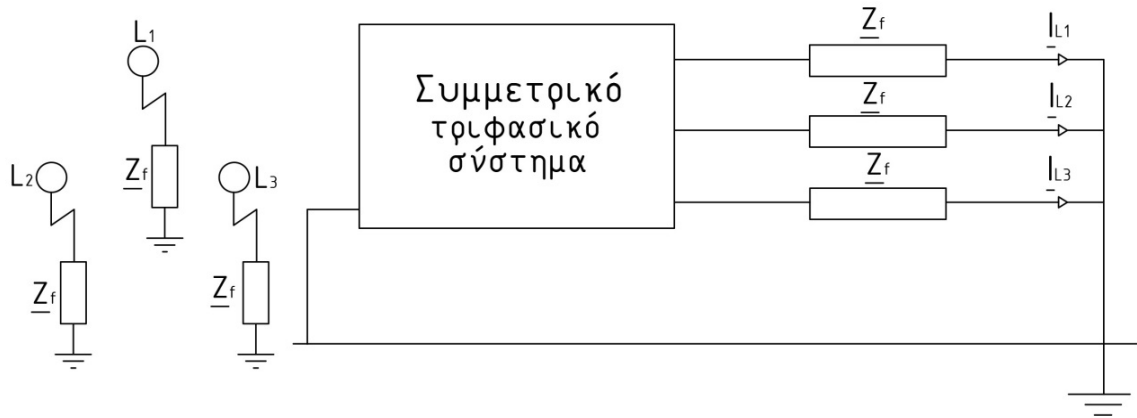
και δουλεύοντας όπως και στο προηγούμενο τύπο σφάλματος καταλήγουμε στον υπολογισμό των εντάσεων σφάλματος μέσω των εξής σχέσεων:

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_1 = \frac{\underline{V}_{L1}}{(\underline{Z}_0 + \underline{Z}_f)} \quad (1-57)$$

$$\underline{I}_{L2} = \underline{a}^2 \underline{I}_1 \quad (1-58)$$

$$\underline{I}_{L3} = \underline{a} \underline{I}_1 \quad (1-59)$$

Όπως ισχύει και για τους προηγούμενους τύπους σφαλμάτων, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος με μηδενική σύνθετη αντίσταση σφάλματος, η ένταση σφάλματος υπολογίζεται θέτοντας την $\underline{Z}_f$ ίση με το μηδέν.



Σχήμα 1.17: Τριφασικό σφάλμα με γη, μέσω σύνθετης αντιστάσεως σφάλματος $\underline{Z}_f$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Περιγραφή του προτύπου IEC 60909

2.1 Γενικά

Το πρότυπο IEC 60909 ορίζει τον τρόπο υπολογισμού των εντάσεων βραχυκυκλώσεως σε τριφασικά συστήματα Χ.Τ. και Υ.Τ. έως 550 kV. Αποτελείται δε από 5 μέρη. Το πρώτο μέρος ορίζει μία γενική, πρακτική και συνοπτική μέθοδο υπολογισμού, η οποία οδηγεί σε ακριβή αποτελέσματα. Η παραπάνω μέθοδος ακολουθείται τόσο σε περιπτώσεις συμμετρικών όσο και μη συμμετρικών σφαλμάτων.

Στο δεύτερο μέρος περιγράφονται η προέλευση και η εφαρμογή των συντελεστών διορθώσεως που χρησιμοποιούνται, προς χάρη τεχνικής ακρίβειας, στους υπολογισμούς της πρώτης ενότητας.

Στο τρίτο μέρος γίνεται συγκεντρωτική παρουσίαση παραμέτρων ηλεκτρολογικού εξοπλισμού που χρησιμοποιείται σε Σ.Η.Ε. με σκοπό την καθοδήγηση του μελετητή, σε περίπτωση έλλειψης στοιχείων σε σύστημα Χ.Τ., και την σύγκριση των προτεινόμενων από το πρότυπο τιμών με τις δοθείσες από τον κατασκευαστή, για τη περίπτωση συστημάτων Μ.Τ. και Υ.Τ.

Στο τέταρτο μέρος ορίζεται η μέθοδος υπολογισμού των ρευμάτων βραχυκυκλώσεως κατά τη διάρκεια δύο ξεχωριστών αλλά ταυτόχρονων σφαλμάτων με γη, καθώς και των επιμέρους ρευμάτων που θα διέλθουν μέσω γης στην περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη σε καλά γειωμένο σύστημα ή σε σύστημα ουδετέρου γειωμένου μέσω χαμηλής αντιστάσεως.

Τέλος, στο πέμπτο μέρος παρουσιάζονται παραδείγματα υπολογισμών εντάσεων βραχυκυκλώσεως για διάφορα ηλεκτρικά συστήματα ώστε, μέσω της πρακτικής εφαρμογής του προτύπου, αυτό να γίνει καλύτερα κατανοητό από τον μελετητή.

Γενικώς, ζητούμενο του IEC 60909 είναι ο υπολογισμός δύο ρευμάτων βραχυκυκλώσεως, τα οποία διαφέρουν ως προς το μέγεθος τους:

- Του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως, το οποίο καθορίζει τις ονομαστικές τιμές του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού (διαστασιολόγηση) και

του ελάχιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως το οποίο μπορεί να αποτελέσει βάση, παραδείγματος χάρη, για την επιλογή των ασφαλειών, για τη ρύθμιση των προστατευτικών διατάξεων και για τον έλεγχο της εκκινήσεως των κινητήρων.

2.2 Παραδοχές μεθόδου υπολογισμού

Ο υπολογισμός του μέγιστου και του ελάχιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως βασίζεται στις εξής απλουστεύσεις:

- 1) Καθ' όλη τη διάρκεια του σφάλματος δεν υφίσταται αλλαγή ως προς το τύπο του σφάλματος, ήτοι ένα σφάλμα βραχυκυκλώσεως τριών φάσεων παραμένει τριφασικό και ένα βραχυκύκλωμα γραμμής με γη παραμένει σφάλμα γης.
- 2) Καθ' όλη τη διάρκεια του σφάλματος, δεν υπάρχει αλλαγή στην τοπολογία του συστήματος.
- 3) Τα συστήματα αλλαγής τάσεως υπό φορτίο (ΣΑΤΥΦ) των Μ/Σ θεωρούνται ότι λειτουργούν στη κύρια θέση.
- 4) Οι αντιστάσεις των ηλεκτρικών τόξων, που προκαλούνται στο σημείο βραχυκυκλώσεως, αμελούνται.
- 5) Οι χωρητικότητες γραμμής και οι εγκάρσιες αγωγιμότητες, με εξαίρεση αυτές της ομοπολικής ακολουθιακής συνιστώσας συγκεκριμένων περιπτώσεων, καθώς και τα μη στρεφόμενα φορτία αμελούνται.

Κατά τον υπολογισμό του μέγιστου ρεύματος βραχυκυκλώσεως, είναι απαραίτητο να γίνουν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Χρήση του συντελεστή τάσεως $c_{\max}$ για τον υπολογισμό των μέγιστων ρευμάτων βραχυκυκλώσεως, ο οποίος εν απουσία σχετικών εθνικών πρότυπων, επιλέγεται σύμφωνα με τον Πίνακα 1, βλέπε παρακάτω.
- Επιλογή αυτής της διατάξεως του συστήματος και της μέγιστης συνεισφοράς από μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και δίκτυα τροφοδοσίας, οι οποίες θα έχουν ως αποτέλεσμα τη μέγιστη τιμή εντάσεως βραχυκυκλώσεως στη θέση σφάλματος.
- Όταν χρησιμοποιούνται ισοδύναμες σύνθετες αντιστάσεις $\underline{Z}_0$ για να αναπαραστήσουν εξωτερικά δίκτυα, θα χρησιμοποιείται η ελάχιστη

ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως, η οποία θα αντιστοιχεί στη μέγιστη συνεισφορά του εξωτερικού δικτύου στο ρεύμα βραχυκυκλώσεως.

- Οι κινητήρες θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς σε περίπτωση που:

1. $\sum I_{rM} > 0,01 I''_{km}$, όσον αφορά κινητήρες που τροφοδοτούνται από συστήματα ισχύος Χ.Τ., όπου:

$\sum I_{rM}$ είναι το άθροισμα των ονομαστικών ρευμάτων των κινητήρων, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι απευθείας στο εσφαλμένο δίκτυο και

I''_{km} είναι η αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως χωρίς την συνεισφορά των κινητήρων.

2. $\frac{\sum P_{rM}}{\sum S_{rT}} > \frac{0,8}{\left| \frac{c \cdot 100 \sum S_{rT}}{\sqrt{3} U_{nQ} I''_k} - 0,3 \right|}$, όσον αφορά κινητήρες Μ.Τ. & Χ.Τ. συνδεδεμένων

μέσω Μ/Σ στο εσφαλμένο δίκτυο, όπου:

$\sum P_{rM}$ είναι το άθροισμα των ονομαστικών πραγματικών ισχύων των κινητήρων Μ.Τ. & Χ.Τ.,

$\sum S_{rT}$ είναι το άθροισμα των ονομαστικών φαινομένων ισχύων των Μ/Σ, μέσω των οποίων τροφοδοτούνται οι κινητήρες Μ.Τ. & Χ.Τ.,

I''_k είναι η αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως στο σημείο συνδέσεως Q με το δίκτυο τροφοδοτήσεως και

U_{nQ} είναι η ονομαστική τάση του συστήματος στο σημείο συνδέσεως Q με το δίκτυο τροφοδοτήσεως.

- Η ωμική αντίσταση R_L των γραμμών (εναέριες γραμμές και καλώδια) θα χρησιμοποιηθεί στη τιμή που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 20°C.

Αναλόγως, όταν υπολογίζουμε το ελάχιστο ρεύμα βραχυκυκλώσεως, είναι απαραίτητο να γίνουν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Χρήση του συντελεστή τάσεως c_{min} για τον υπολογισμό των ελάχιστων ρευμάτων βραχυκυκλώσεως, ο οποίος λαμβάνεται σύμφωνα με τον Πίνακα 1.
- Επιλογή αυτής της διατάξεως του συστήματος και της ελάχιστης συνεισφοράς από μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και δίκτυα τροφοδοσίας, οι

οποίες θα έχουν ως αποτέλεσμα την ελάχιστη τιμή ρεύματος βραχυκυκλώσεως στη θέση σφάλματος.

- Οι κινητήρες αμελούνται.
- Η ωμική αντίσταση R_L των γραμμών (εναέριες γραμμές και καλώδια, ενεργοί αγωγοί και αγωγοί ουδετέρου) θα χρησιμοποιηθεί στη τιμή που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία υψηλότερη των 20°C σύμφωνα με την εξ. 2-1:

$$R_L = [1 + \alpha (\theta_e - 20^\circ\text{C})] * R_{L20} \quad (2-1)$$

όπου

R_{L20} είναι η τιμή της ωμικής αντιστάσεως που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία 20 °C,

θ_e είναι η θερμοκρασία του αγωγού, σε βαθμούς κελσίου, στο τέλος της διάρκειας του βραχυκυκλώματος και

α είναι συντελεστής ίσος με 0,004/K, επαρκώς ακριβής για τις πλείστες περιπτώσεις που αφορούν χαλκό, αλουμίνιο και κράμα αλουμινίου.

2.3 Μέθοδος ισοδύναμης πηγής τάσεως

Σύμφωνα με τον [1] ως ισοδύναμη πηγή τάσεως, $cU_n/\sqrt{3}$, ορίζεται μια ιδανική πηγή τάσεως, η οποία εφαρμόζεται στη θέση σφάλματος του συστήματος θετικής ακολουθίας για τον υπολογισμό του ρεύματος βραχυκυκλώσεως. Αποτελεί δε την μοναδική ενεργό τάση του δικτύου.

Τα διάφορα δίκτυα τροφοδοσίας, οι σύγχρονες και οι ασύγχρονες μηχανές βραχυκυκλώνονται και αντικαθίστανται από τις εσωτερικές σύνθετες αντιστάσεις τους. Δεδομένα λειτουργίας, το φορτίο των καταναλωτών, η θέση των ΣΑΤΥΦ και η διέγερση των γεννητριών δεν λαμβάνονται υπόψη. Ωστόσο εισάγονται συντελεστές διορθώσεως συνθέτης αντιστάσεως, K , για τα επιμέρους στοιχεία του Σ.Η.Ε. και συντελεστής διορθώσεως τάσεως, c , για τις διακυμάνσεις της τάσεως λειτουργίας ανάλογα με το χώρο και το χρόνο, τις μεταβολές στη ροή φορτίου, τη λειτουργία του ΣΑΤΥΦ και τη μεταβατική συμπεριφορά των σύγχρονων και ασύγχρονων μηχανών. Επιπλέον υπολογισμοί για διαφορετικές ροές φορτίου, πέραν της ονομαστικής, την στιγμή του σφάλματος κρίνονται περιττοί.

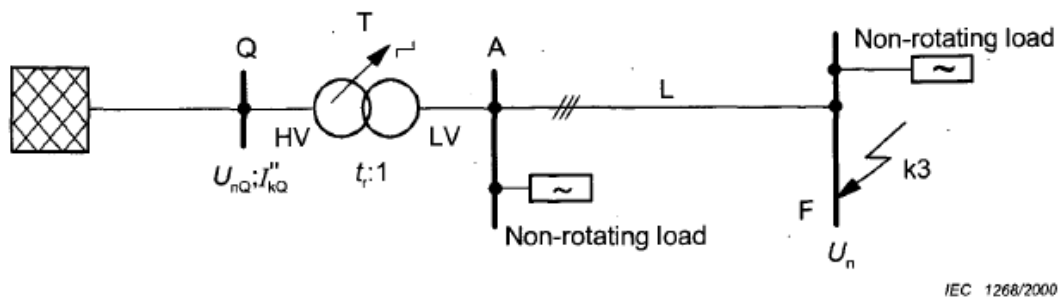
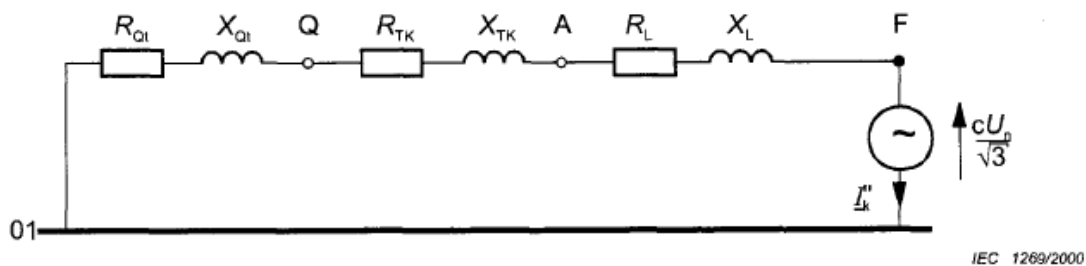


Figure 4a – System diagram



Σχήμα 2.1: Τριφασικό βραχυκύκλωμα στη θέση σφάλματος F α) Μονογραμμικό διάγραμμα συστήματος και (β) ισοδύναμο διάγραμμα του συστήματος θετικής ακολουθίας^{2.1}

Το σχ. 2.1 απεικονίζει την εφαρμογή της μεθόδου ισοδύναμης πηγής τάσεως σε δίκτυο όπου υφίσταται τριφασικό βραχυκύκλωμα. Τα στρεφόμενα φορτία αμελούνται ενώ το δίκτυο τροφοδοσίας και ο Μ/Σ δικτύου αντικαθίστανται από τις αντίστοιχες σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως. Οι σύνθετες αντιστάσεις του δικτύου τροφοδοσίας και του Μ/Σ δικτύου ανάγονται στο τύλιγμα Χ.Τ., ενώ η τελευταία διορθώνεται μέσω του συντελεστή K_T , βλέπε παράγραφο 2.4 παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι εν απουσία σχετικών εθνικών πρότυπων, ο συντελεστής τάσεως c επιλέγεται σύμφωνα με τον Πίνακα 1^{2.2}.

Πίνακας 1 - Συντελεστής τάσεως c

Ονομαστική τάση U_n	Συντελεστής τάσεως c για τον υπολογισμό της	
	μέγιστης εντάσεως σφάλματος $c_{\max}^{1)}$	ελάχιστης εντάσεως σφάλματος $c_{\min}$
Χαμηλή τάση 100V έως 1 kV (IEC 60038, Πίνακας 1)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Μέση τάση >1kV έως 35 kV (IEC 60038, Πίνακας 3)	1,1	1
Υψηλή τάση ²⁾ > 35 kV (IEC 60038, Πίνακας 5)		

1) Ο συντελεστής $c_{\max} * U_n$ δεν πρέπει να ξεπεράσει τη μέγιστη τάση λειτουργίας U_m των εξοπλισμών των συστημάτων ισχύος.

2) Εάν δεν ορίζεται ονομαστική ισχύς, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις $c_{\max} * U_n = U_m$ ή $c_{\min} * U_n = 0.9 * U_m$.

3) Για συστήματα χαμηλής τάσεως με ανοχή της τάξεως του +6%, παραδείγματος χάρη συστήματα κυμαινόμενα από 380 V έως 420 V.

4) Για συστήματα χαμηλής τάσεως με ανοχή της τάξεως του +10%.

2.4 Σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως

Ο υπολογισμός των εντάσεων βραχυκυκλώσεως, όπως αναλύθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, απλοποιείται μέσω του μετασχηματισμού του τριφασικού συστήματος Ε.Ρ. σε σύστημα τριών συμμετρικών συνιστωσών. Τουτέστιν, καθίσταται απαραίτητος ο υπολογισμός των ακολουθιακών συνθέτων αντιστάσεων των επιμέρους στοιχείων του ηλεκτρικού συστήματος. Αυτές υπολογίζονται βάσει των ονομαστικών στοιχείων του εξοπλισμού, των δοθεισών τιμών από τον κατασκευαστή και από τη γεωμετρική διάταξη των στοιχείων.

Όσον αφορά δίκτυα τροφοδοσίας, Μ/Σ, εναέριες γραμμές, υπόγεια καλώδια, επαγωγικά πηνία και παρόμοιο εξοπλισμό, γενικά ισχύει ότι οι σύνθετες αντιστάσεις θετικής ακολουθίας και αρνητικής ακολουθίας είναι ίσες, $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$. Δεν ισχύει το ίδιο για την περίπτωση στρεφόμενων μηχανών. Το πρότυπο IEC 60909 εισάγει έναν αριθμό συντελεστών διορθώσεως σύνθετης αντιστάσεως με σκοπό τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια αποτελεσμάτων, διατηρώντας παράλληλα την απλότητα της μεθόδου υπολογισμού. Οι συντελεστές διορθώσεως που εισάγονται είναι:

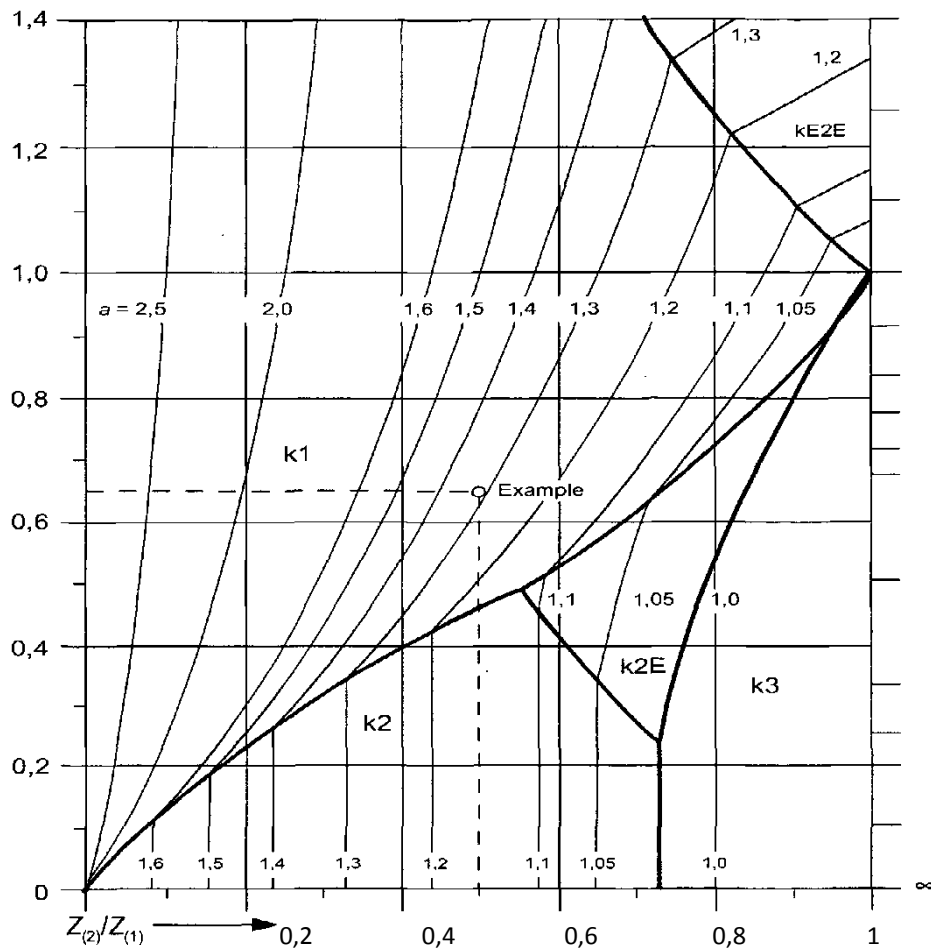
- Ο συντελεστής K_T για την διόρθωση της σύνθετης αντιστάσεως Μ/Σ δικτύου.
- Οι συντελεστές K_G, K_S και K_{SO} για την διόρθωση των σύνθετων αντιστάσεων γεννήτριας και ηλεκτροπαραγωγού μονάδος, ήτοι σύγχρονης γεννήτριας συνδεδεμένης στο δίκτυο μέσω Μ/Σ ανυψώσεως με ή χωρίς ΣΑΤΥΦ.

2.5 Υπολογισμός εντάσεων βραχυκυκλώσεως

Στις περιπτώσεις βραχυκυκλώματος “μακράν” της γεννήτριας, υπολογίζουμε την αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως, I''_k , και τη τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως, i_p . Από το σχ. 1.2 προκύπτει ότι $I''_k \approx I_b \approx I_k$. Όσον αφορά τις περιπτώσεις βραχυκυκλώματος ‘πλησίον’ της γεννήτριας, υπολογίζουμε εκτός της αρχικής συμμετρικής εντάσεως, I''_k , και της τιμής κορυφής εντάσεως, i_p , τις τιμές εντάσεως διακοπής, I_b , και μονίμου καταστάσεως, I_k .

Για τον υπολογισμό της αρχικής συμμετρικής εντάσεως βραχυκυκλώσεως, I''_k , της συμμετρικής εντάσεως διακοπής, I_b , και της εντάσεως βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως, I_k , το εσφαλμένο Σ.Η.Ε. μπορεί να μετατραπεί, μέσω της απλούστευσης των εμπλεκόμενων δικτύων, σε μια ισοδύναμη αντίσταση βραχυκυκλώσεως, $\underline{Z}_k$, στη θέση σφάλματος. Ωστόσο, κατά τον υπολογισμό της τιμής κορυφής εντάσεως βραχυκυκλώσεως, i_p , είναι απαραίτητη η διάκριση μεταξύ δικτύων με ή χωρίς παράλληλους κλαδούς.

Η τιμή της αρχικής συμμετρικής εντάσεως βραχυκυκλώσεως, I''_k , εξαρτάται από τις σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως των ισοδύναμων κυκλωμάτων θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας. Βασιζόμενοι στους λόγους των ακολουθιακών σύνθετων αντιστάσεων $\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)}$ και $\underline{Z}_{(2)}/\underline{Z}_{(1)}$, μπορούμε να εκτιμήσουμε το τύπο βραχυκυκλώματος εκ του οποίου θα προκύψει η μέγιστη ένταση βραχυκυκλώσεως.



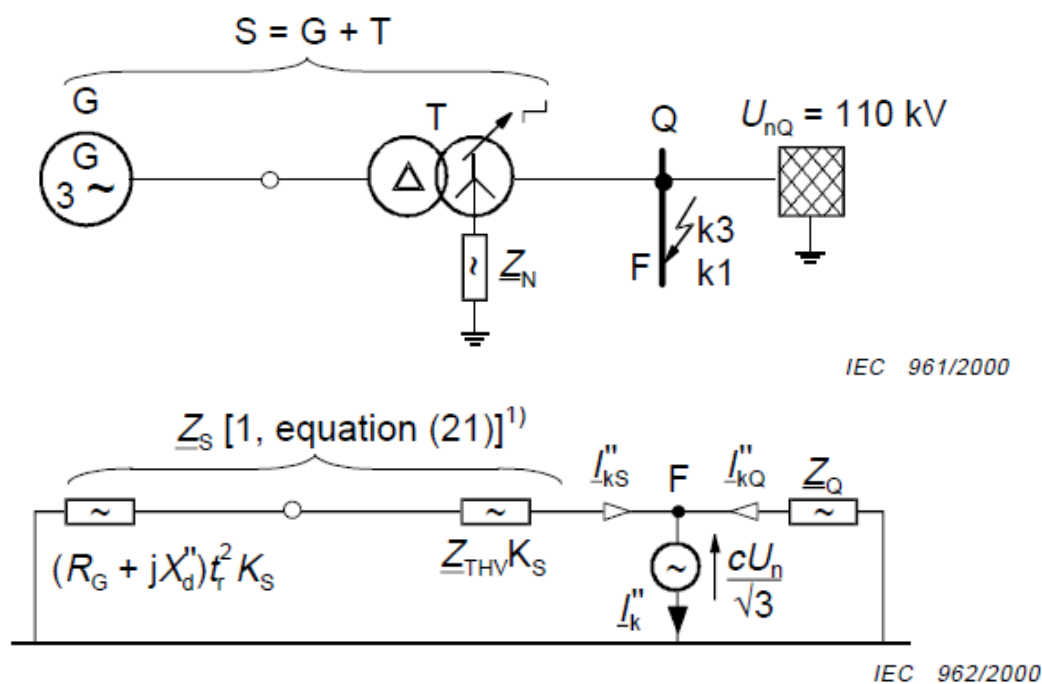
Σχήμα 2.2: Εκτίμηση της μέγιστης εντάσεως βραχυκυκλώσεως για διάφορους τύπους σφαλμάτων και διάφορους λόγους αντιστάσεων $\underline{Z}_{(0)}/\underline{Z}_{(1)}$ και $\underline{Z}_{(2)}/\underline{Z}_{(1)}$. Οι ακολουθιακές συνιστώσες σύνθετης αντιστάσεως βραχυκυκλώσεως $\underline{Z}_{(0)}$, $\underline{Z}_{(1)}$ και $\underline{Z}_{(2)}$ θεωρούνται συμφασικές^{2,3}

Το σχ. 2.2 αναπαριστά τη σχέση των αρχικών εντάσεων βραχυκυκλώσεως διαφόρων τύπων σφαλμάτων ως προς την ένταση βραχυκυκλώσεως ενός τριφασικού σφάλματος, κατά τη μεταβολή των απόλυτων τιμών των προαναφερθέντων λόγων σύνθετων αντιστάσεων. Ο όρος a αντιστοιχεί στο λόγο της εντάσεως βραχυκυκλώσεως ασύμμετρου σφάλματος προς την ένταση βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος. Το σχήμα χρησιμεύει σαν μια πρώτη εκτίμηση αλλά σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να υποκαταστήσει τον υπολογισμό των τιμών.

Ένα βραχυκύκλωμα μπορεί να τροφοδοτείται από παραπάνω από μια πηγή. Ο υπολογισμός της εντάσεως βραχυκυκλώσεως στην περίπτωση συμμετρικού

σφάλματος σε ακτινωτό δίκτυο συνιστάται στην υπέρθεση των επιμέρους συνεισφορών της κάθε πηγής τροφοδοτήσεως. Ωστόσο, στην περίπτωση βρογχοειδούς δικτύου ή ασύμμετρου σφάλματος, καθίσταται απαραίτητη η απλούστευση του δικτύου και ο υπολογισμός των ισοδύναμων σύνθετων αντιστάσεων $\underline{Z}_{(1)}$, $\underline{Z}_{(2)}$ και $\underline{Z}_{(0)}$.

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909-0 όταν η $\underline{Z}_{(0)}$ είναι μεγαλύτερη των $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$, η μέγιστη αρχική ένταση βραχυκυκλώσεως προκύπτει από τριφασικό σφάλμα. Εντούτοις, στη περίπτωση σφάλματος πλησίον Μ/Σ με μικρή σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας, ήτοι $\underline{Z}_{(0)} < \underline{Z}_{(1)}$, η μέγιστη αρχική ένταση βραχυκυκλώσεως προκύπτει από διφασικό σφάλμα προς γη.



Σχήμα 2.3: Μονογραμμικό διάγραμμα Σ.Η.Ε. και ισοδύναμο διάγραμμα κυκλώματος θετικής ακολουθίας για την περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος στην πλευρά Υ.Τ. του Μ/Σ μονάδος^{2.4}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου

3.1 Γενικά

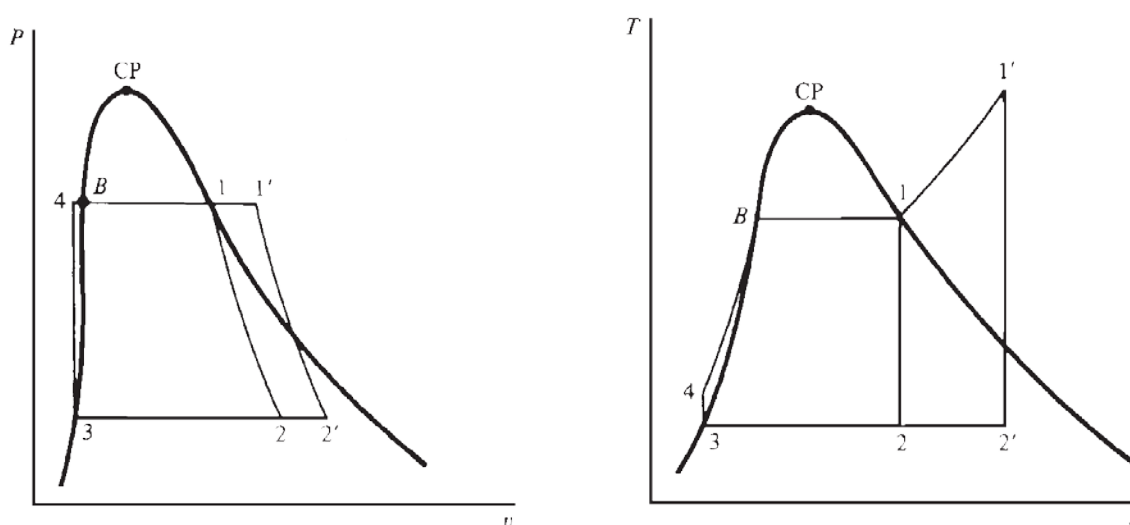
Ο σχεδιασμός, η λειτουργία και η απόδοση ενός θερμικού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται στις αρχές της θερμοδυναμικής. Το φυσικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα περιγράφεται ως η μετατροπή μέρους της θερμικής ενέργειας του ατμού ή των καυσαερίων (όσον αφορά την περίπτωση ατμοστροβίλου και αεριοστροβίλου αντίστοιχα) σε μηχανική. Η μηχανική ισχύς κινεί τον άξονα της στροβιλογεννήτριας μέσω της οποίας παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια.

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής εκφράζει την αρχή διατηρήσεως της ενέργειας. Δηλώνει ότι η ενέργεια δεν μπορεί να δημιουργηθεί ούτε να καταστραφεί εκ του μηδενός, παρά μόνο να μετατραπεί σε μια άλλη μορφή ενέργειας. Η ενέργεια ενός συστήματος το οποίο υπόκειται μια (θερμοδυναμική) διεργασία μπορεί να μεταβληθεί αναλόγως της ανταλλαγής της ενέργειας του με το περιβάλλον. Για την μετατροπή της θερμότητας σε έργο (ισχύ) σε συνεχή βάση, πρέπει να υπάρξει λειτουργία σε κύκλο. Ως θερμικός κύκλος ορίζεται μια σειρά διεργασιών η οποία εκκινεί και σταματά ευρισκόμενη στην ίδια κατάσταση και μπορεί να επαναληφθεί επ' άπειρον, μετατρέποντας σε κάθε επανάληψη την θερμότητα σε μηχανικό έργο.

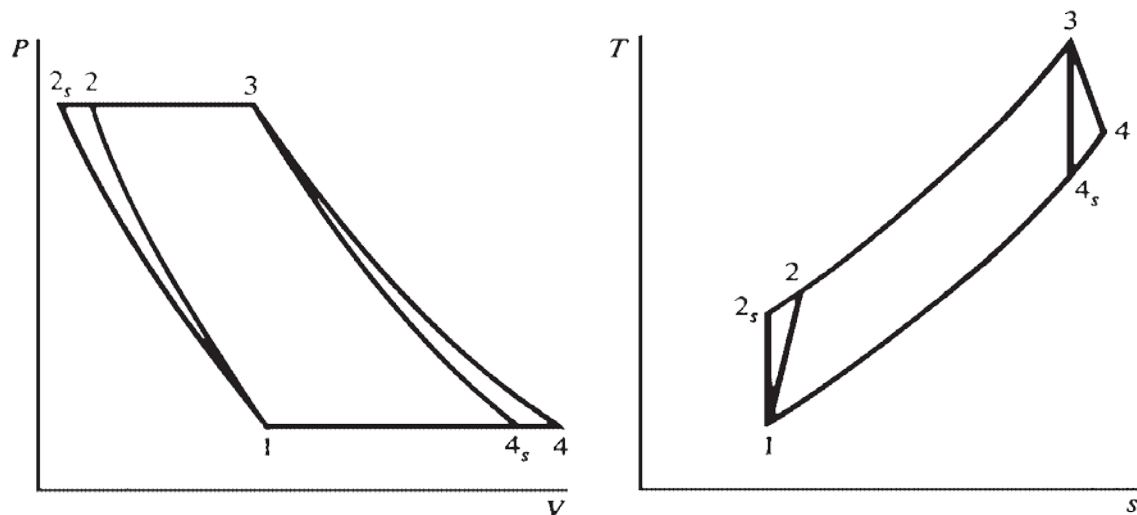
Βασικό χαρακτηριστικό όλων των θερμικών σταθμών αποτελεί η εκτέλεση ενός θερμικού κύκλου, το εργαζόμενο μέσο του οποίου χαρακτηρίζει τη φύση και τη λειτουργία του σταθμού. Η θερμότητα λαμβάνεται από ένα θερμοδοχείο υψηλής θερμοκρασίας, όπως ο ατμοπαραγωγός ανακτήσεως θερμότητας (λέβητας) ή ο θάλαμος καύσης. Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής θέτει ένα περιορισμό στη μετατροπή της θερμότητας σε έργο, δηλαδή δηλώνει ότι η θερμική απόδοση της μετατροπής της θερμότητας σε μηχανικό έργο, σε ένα σταθμό παραγωγής ενέργειας, πρέπει να είναι μικρότερη της μονάδος. Η υπόλοιπη θερμότητα αποβάλλεται σε ένα θερμοδοχείο χαμηλής θερμοκρασίας όπως το ψυγείο ή το

περιβάλλον. Το έργο που παράγεται σε ένα θερμικό σταθμό παραγωγής είναι η διαφορά μεταξύ της λαμβανόμενης θερμότητας από το θερμοδοχείο υψηλής θερμοκρασίας και της αποβαλλόμενης θερμότητας στο θερμοδοχείο χαμηλής θερμοκρασίας.

Σε ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου εκτελούνται δύο θερμικοί κύκλοι, ο κύκλος με χρήση νερού-ατμού Rankine και ο κύκλος με αέρα-καυσαέριο Joule-Brayton. Ως συνδυασμένος κύκλος ορίζεται ο συνδυασμός των δύο παραπάνω θερμικών κύκλων. Ως αποτέλεσμα του συνδυασμού των δύο κύκλων, ο βαθμός αποδόσεως που επιτυγχάνεται είναι υψηλότερος σε σχέση με λειτουργία σε απλό κύκλο. Υπάρχει δυνατότητα συνδυασμού θερμικών κύκλων με τα ίδια ή διαφορετικά εργαζόμενα μέσα. Εντούτοις, ένας συνδυασμός κύκλων με διαφορετικά εργαζόμενα μέσα παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον λόγω της αλληλοσυμπλήρωσης τους μέσω των επιμέρους πλεονεκτημάτων τους. Σε κανονική λειτουργία συνδυασμένου κύκλου, ο κύκλος με τα υψηλότερα επίπεδα θερμοκρασίας λειτουργίας ονομάζεται ανώτερος κύκλος. Η αποβαλλόμενη θερμότητα που αυτός παράγει στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε μια δεύτερη διεργασία, η οποία λειτουργεί σε χαμηλότερα επίπεδα θερμοκρασιών και ως εκ τούτου ονομάζεται κατώτερος κύκλος. Ο συνδυασμός κύκλου που χαίρει ευρείας αποδοχής και χρησιμοποίησης σε σταθμούς παραγωγής είναι ο συνδυασμός στροβίλων αερίου και ατμού.



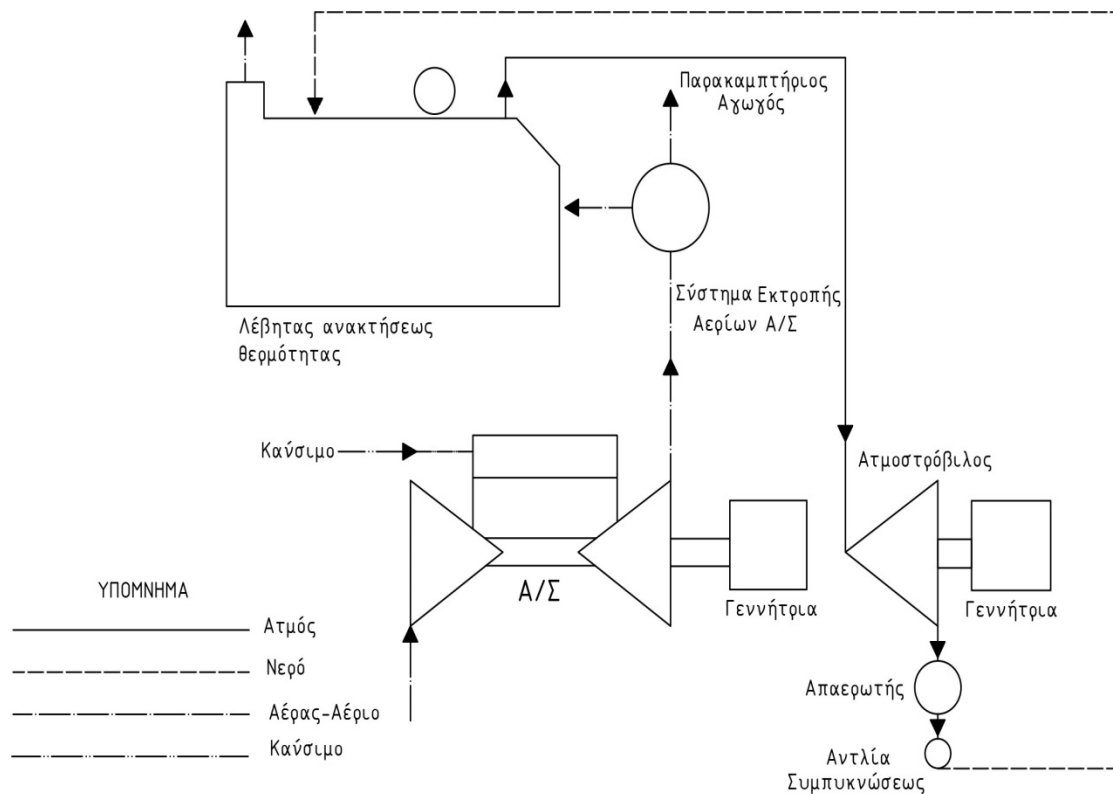
Σχήμα 3.1: Ιδανικός κύκλος Rankine σε διαγράμματα P - V και T - S ^{3.1}



Σχήμα 3.2: Απλός ιδανικός (1-2s-3-4s) & μη ιδανικός (1-2-3-4) κύκλος Joule-Brayton σε διαγράμματα P-V και T-S^{3,2}

Μια απλουστευμένη περιγραφή της λειτουργίας μιας μονάδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου είναι η ακόλουθη:

Ο συμπιεστής συμπιέζει τον αναρροφούμενο από το περιβάλλον αέρα, τροφοδοτεί δε τον θάλαμο καύσεως όπου πραγματοποιείται η καύση του αέρα με φυσικό αέριο. Τα παραγόμενα καυσαέρια υπό θερμοκρασία TIT (Temperature Inlet Turbine) εισέρχονται στον αεριοστρόβιλο όπου λαμβάνει χώρα μετατροπή της ενθαλπίας τους σε μηχανική ενέργεια. Η παραγόμενη έτσι μηχανική ενέργεια αποτελεί ένα μέρος της ενέργειας της μονάδος συνδυασμένου κύκλου. Η θερμότητα των παραγόμενων καυσαερίων δεν απορρίπτεται αλλά τροφοδοτεί έναν ατμοπαραγωγό ανακτήσεως θερμότητας (ΑΑΘ ή HRSG). Ο ατμοπαραγωγός παράγει ατμό υψηλών χαρακτηριστικών ο οποίος με την σειρά του εκτονώνεται στον ατμοστρόβιλο, επιτυγχάνοντας επιπρόσθετη παραγωγή ενέργειας. Τέλος, ο εκτονωμένος ατμός οδηγείται στον συμπυκνωτή όπου συμπυκνώνεται και επαναχρησιμοποιείται στον κύκλο ατμού.



Σχήμα 3.3: Λειτουργικό διάγραμμα σταθμού παραγωγής συνδυασμένου κύκλου μίας πίεσεως και χωρίς αναθέρμανση^{3.3}

3.2 Αεριοστρόβιλος

Ο αεριοστρόβιλος (Α/Σ) αποτελεί μία θερμική μηχανή, τουτέστιν μια μηχανή η οποία παράγει μηχανική ισχύ μέσω των κινητικών δυνάμεων που ασκεί η ροή θερμής μάζας αερίου στα πτερύγια της. Ο αεριοστρόβιλος χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αποτελεί την κινητήρια μηχανή πλοίων, αεροσκαφών όλων των ειδών καθώς και αντλιών, συμπιεστών ενώ τις τελευταίες δεκαετίες έχει αποκτήσει σημαντικό μερίδιο και στην παραγωγή ενέργειας. Είναι μια συμπαγής μηχανή, μικρού βάρους και με δυνατότητες τροφοδοτήσεως από διάφορα είδη καυσίμων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά αναδεικνύουν τον αεριοστρόβιλο σε φυσική επιλογή όσον αφορά υπεράκτιες πλατφόρμες ή κινητούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα πλεονεκτήματα των αεριοστρόβιλων είναι τα εξής:

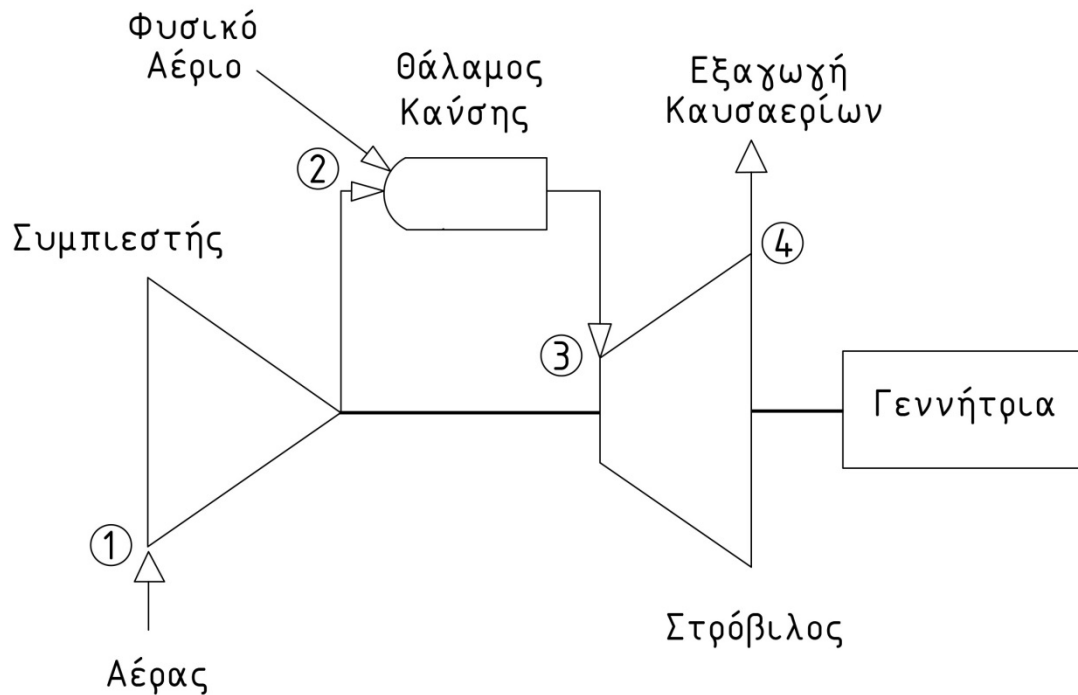
- Έχουν μικρό μέγεθος, μικρή μάζα και φθηνό αρχικό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας (ανά kWh).

- Ο χρόνος παράδοσης τους είναι σχετικά μικρός και η εγκατάστασή τους γρήγορη.
- Έχουν γρήγορη εκκίνηση (ελάχιστο όριο τα 10s), η οποία συχνά γίνεται με αυτόματο χειρισμό.
- Έχουν ομαλή λειτουργία ενώ το ποσοστό χρόνου κατά τη διάρκεια του οποίου η μονάδα είναι σε θέση να λειτουργεί υπό πλήρες φορτίο προσεγγίζει το 98% (υψηλός συντελεστής εκμετάλλευσης).
- Χρησιμοποιούν ένα μεγάλο φάσμα υγρών και αέριων καυσίμων, στα οποία συμπεριλαμβάνονται ο αεριοποιημένος άνθρακας και τα συνθετικά καύσιμα.
- Υπόκεινται σε λιγότερους περιβαλλοντικούς περιορισμούς σε σχέση με άλλες κινητήριες μηχανές.

Όπως προαναφέρθηκε ο αεριοστρόβιλος λειτουργεί με βάση τον θερμικό κύκλο Joule-Brayton ενώ στην απλούστερη του μορφή αποτελείται από:

- τον συμπιεστή, μέσω του οποίου αυξάνεται η πίεση του αέρα,
- τον θάλαμο καύσεως, εντός του οποίου λαμβάνει χώρα η καύση και η παραγωγή καυσαερίων, και
- τον στρόβιλο, ο οποίος εκμεταλλευόμενος την υψηλή θερμοκρασία και πίεση των καυσαερίων, μετατρέπει την χημική τους ενέργεια σε περιστροφική κίνηση τού άξονα της μηχανής. Η εκτόνωση των καυσαερίων γίνεται σε περισσότερες από μία βαθμίδες. Η κάθε βαθμίδα αποτελείται από μία σταθερή και μια κινητή πτερύγωση.

Το σχ. 3.4 απεικονίζει μια απλουστευμένη διάταξη αεριοστρόβιλου απλού κύκλου σε μονάδα παραγωγής. Ο συμπιεστής αυξάνει τη πίεση του αέρα εισόδου κατά 10 έως 15 φορές. Το έργο που απαιτείται από τον συμπιεστή εμφανίζεται στη ροή με τη μορφή της αυξανόμενης θερμοκρασίας (μεταβολή 1-2(2s) στο σχ. 3.2). Η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα στην έξοδο του συμπιεστή είναι περίπου 399 έως 466° C. Το καύσιμο αφού αναμιχθεί με τον πεπιεσμένο αέρα καίγεται στο θάλαμο καύσεως και παράγονται καυσαέρια θερμοκρασίας 1000 έως 1400° C (μεταβολή 2-3 στο σχ. 3.2). Ο Α/Σ με την σειρά του μετατρέπει την ενέργεια των καυσαερίων σε μηχανική. Η θερμοκρασία των καυσαερίων εξόδου του Α/Σ κυμαίνεται από 482 έως 638° C.



Σχήμα 3.4: Τυπική διάταξη μονάδος ηλεκτροπαραγωγής με αεριοστρόβιλο απλού κύκλου^{3,4}

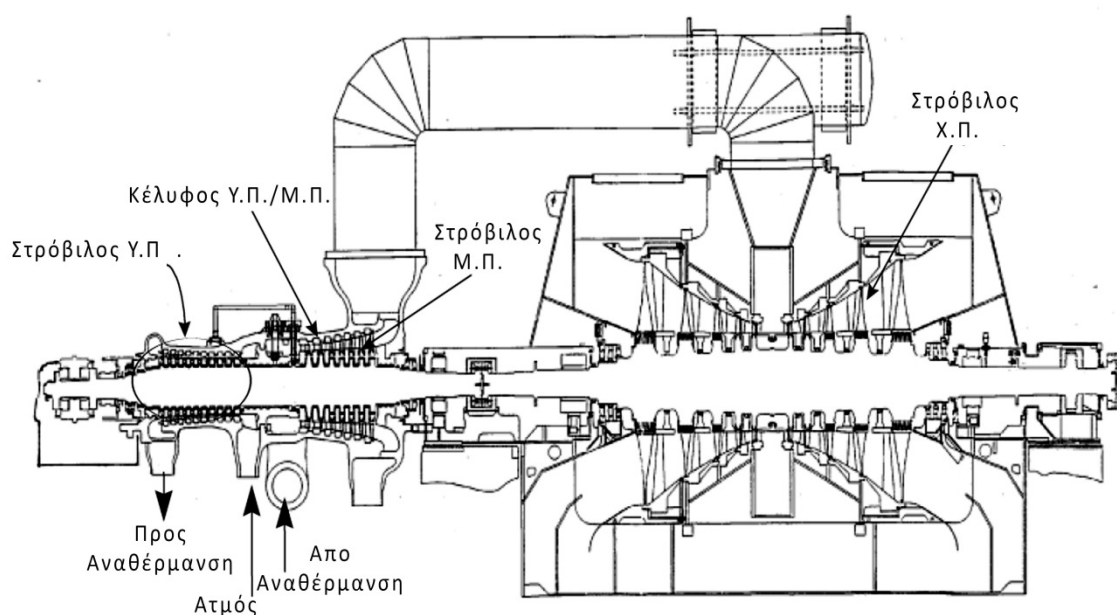
Ο αεριοστρόβιλος αποτελεί τη σημαντικότερη συνιστώσα ενός σταθμού παραγωγής συνδυασμένου κύκλου. Η ευρεία χρήση του συνδυασμένου κύκλου στους σταθμούς παραγωγής οφείλεται στην ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των αεριοστροβίλων ιδιαίτερα όσον αφορά στην δυνατότητα λειτουργίας με αυξημένη θερμοκρασία εισόδου των καυσαερίων, ΤΙΤ. Παράλληλα με την ανάπτυξη του αεριοστροβίλου, υπήρξε βελτίωση και στους συμπιεστές με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα χειρισμού αρκετά μεγαλύτερων ροών θερμής μάζας σε συνδυασμό με ακόμα μεγαλύτερους λόγους συμπίεσεως, καθιστώντας δυνατή την παραγωγή υψηλότερης ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλού βαθμού αποδόσεως και μικρότερου κόστους. Ωστόσο τίθενται περιορισμοί στην περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας εισόδου λόγω περιορισμένης αντοχής των υλικών του στροβίλου στις υψηλές θερμοκρασίες, ειδικά στη πρώτη βαθμίδα αυτού.

3.3 Ατμοστρόβιλος

Ο ατμοστρόβιλος είναι μια θερμική μηχανή εντός της οποίας ατμός υψηλής θερμοκρασίας και πίεσεως (υψηλής ενθαλπίας) εκτονώνεται με αποτέλεσμα την

μετατροπή της ενθαλπίας σε μηχανική ενέργεια περιστροφής του άξονα. Κάθε ατμοστρόβιλος αποτελείται από δύο μέρη :

- Το κέλυφος, το οποίο φέρει τα οδηγά πτερύγια. Μέσω αυτών πραγματοποιείται η προσαγωγή του ατμού προς τον δρομέα του στροβίλου.
- Το δρομέα, περιφερειακά του οποίου βρίσκεται η κινητή πτερύγωση. Εκεί πραγματοποιείται η μετατροπή της ενέργειας του ατμού σε περιστροφική κίνηση του δρομέα.



Σχήμα 3.5: Τομή ατμοστροβίλου τριών κελυφών (D-11 της GE)^{3.5}

Ο ατμός εισέρχεται στο στρόβιλο μέσω των ρυθμιστικών βαλβίδων και διοχετεύεται στα κινητά πτερύγια μέσω των ακροφυσίων ή οδηγών πτερυγίων. Η εκτόνωση του ατμού γίνεται σταδιακά σε πολλές βαθμίδες, κάθε βαθμίδα δε αποτελείται από μια στεφάνη σταθερών (οδηγών) και μια στεφάνη κινητών πτερυγίων. Με τη χρήση περισσότερων βαθμίδων αυξάνουμε τον θερμικό βαθμό αποδόσεως του ατμοστροβίλου, αλλά η μεγάλη αύξηση του μήκους στροβίλου δημιουργεί πλήθος άλλων προβλημάτων. Η σταδιακή εκτόνωση του ατμού υλοποιείται με τη χρήση στροβίλων πολλαπλών βαθμίδων, ήτοι υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσεως. Κατά την εκτόνωση του ατμού ελαττώνεται η πίεση αυτού, άρα

αυξάνεται ο όγκος του. Έτσι κατά μήκος της διεύθυνσης της ροής του ατμού έχουμε προοδευτική αύξηση του μήκους των πτερυγίων.

Ο ατμοστρόβιλος μπορεί να είναι στρόβιλος δράσεως ή στρόβιλος αντιδράσεως, ανάλογα με το πώς συμμετέχουν τα σταθερά και κινητά πτερύγια στην εκτόνωση του ατμού. Η αρχή του στροβίλου δράσεως βασίζεται στην αλλαγή της ορμής (mV) της ροής, η οποία κατευθύνεται προς τα κινητά πτερύγια του στροβίλου μέσω των σταθερών οδηγών πτερυγίων. Η αρχή του στροβίλου αντιδράσεως συνιστάται στην δύναμη αντιδράσεως που αναπτύσσεται στα κινητά πτερύγια του στροβίλου λόγω της επιταχύνσεως της ροής η οποία είναι αποτέλεσμα της μείωσης της διατομής της φλέβας ατμού. Πρακτικά στους σύγχρονους ατμοστροβίλους, η ενέργεια του ατμού δεν συνίσταται σε μεμονωμένη δράση ή αντίδραση. Αντί αυτών έχουμε συνδυασμό και των δύο παραπάνω μηχανισμών ανάπτυξης δυνάμεων, παρόλο που ένας από τους δύο μηχανισμούς είναι ο προέχων.

Ο στρόβιλος διαθέτει σύστημα ρυθμίσεως ταχύτητας, το οποίο επενεργεί στην ρύθμιση του ανοίγματος των ρυθμιστικών βαλβίδων εισόδου ατμού. Οι ατμοστρόβιλοι που χρησιμοποιούνται σε σταθμούς παραγωγής συνδυασμένου κύκλου χαρακτηρίζονται από υψηλή απόδοση και μικρούς χρόνους εκκινήσεως. Τα χαρακτηριστικά αυτά σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα του αεριοστροβίλου, παραδείγματος χάρη το μικρό χρόνο εκκινήσεως αυτού, έχουν καθιερώσει τους σταθμούς παραγωγής συνδυασμένου κύκλου σαν σταθμούς κυμαινόμενου φορτίου αλλά και αιχμής φορτίου.

3.4 Ατμοπαραγωγός ανακτήσεως θερμότητας

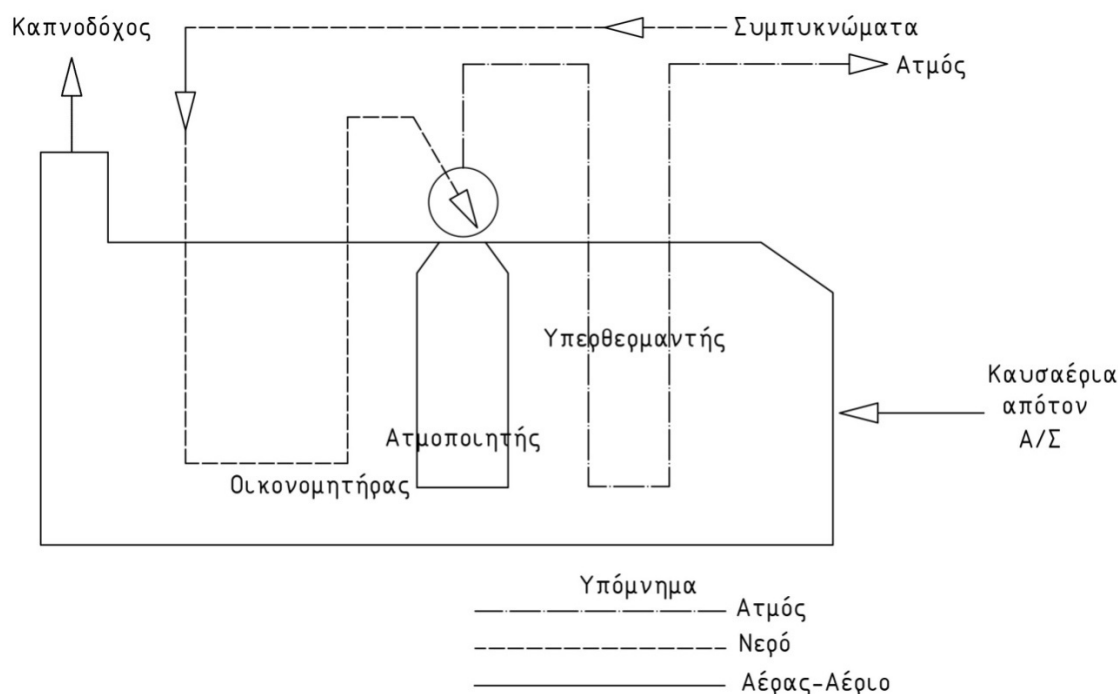
Ο ατμοπαραγωγός ανακτήσεως θερμότητας είναι ένας λέβητας ανακτήσεως θερμότητας από τα καυσαέρια εξόδου του αεριοστροβίλου, συνιστά δε τον σύνδεσμο μεταξύ των κύκλων αερίου-καυσαερίου και νερού-ατμού. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι αναλόγως του αν υφίσταται συμπληρωματική καύση ή όχι:

- Λέβητες ανακτήσεως χωρίς συμπληρωματική καύση.
- Λέβητες ανακτήσεως με συμπληρωματική καύση.
- Ατμοπαραγωγοί με μέγιστη συμπληρωματική καύση.

Ο λέβητας ανακτήσεως χωρίς συμπληρωματική καύση είναι ο τύπος που χρησιμοποιείται συνήθως σε σταθμούς παραγωγής συνδυασμένου κύκλου. Πρακτικά αποτελεί έναν εναλλάκτη θερμότητας με συναγωγή. Κατασκευάζεται ώστε να έχει γρήγορη απόκριση σε αλλαγές φορτίου, αξιοπιστία και διαθεσιμότητα. Σε λειτουργία συνδυασμένου κύκλου, πρέπει να προβλεφθεί η συνύπαρξη του με τον αεριοστρόβιλο και τους χαμηλούς χρόνους εκκινήσεως αυτού.

Με κριτήριο τον τρόπο κατασκευής χωρίζονται σε κατακόρυφους ή βεβιασμένης κυκλοφορίας και οριζόντιους ή φυσικής κυκλοφορίας. Το κύριο πλεονέκτημα της οριζόντιας διάταξης είναι ότι δεν απαιτούνται αντλίες κυκλοφορίας. Με κριτήριο τα επίπεδα πίεσεως λειτουργίας χωρίζονται σε παραγωγή ατμού μίας πίεσης ή πολλαπλών πιέσεων.

Η απλούστερη δυνατή περιγραφή της λειτουργίας του λέβητα ανακτήσεως αφορά στον βασικό κύκλο μιας πίεσης όπου ο λέβητας ανάκτησης παράγει ατμό μίας πίεσης για τον ατμοστρόβιλο, θεωρώντας απλό κύκλο αεριοστρόβιλου όπως αυτός αναλύθηκε στη παράγραφο 3.2.



Σχήμα 3.6: Λέβητας ανακτήσεως θερμότητας μίας πίεσης χωρίς αναθέρμανση^{3.6}

Ο λέβητας ανακτήσεως θερμότητας χωρίζεται στα εξής τμήματα: τον οικονομητήρα, τον ατμοποιητή και τον υπερθερμαντή. Το νερό εκ των

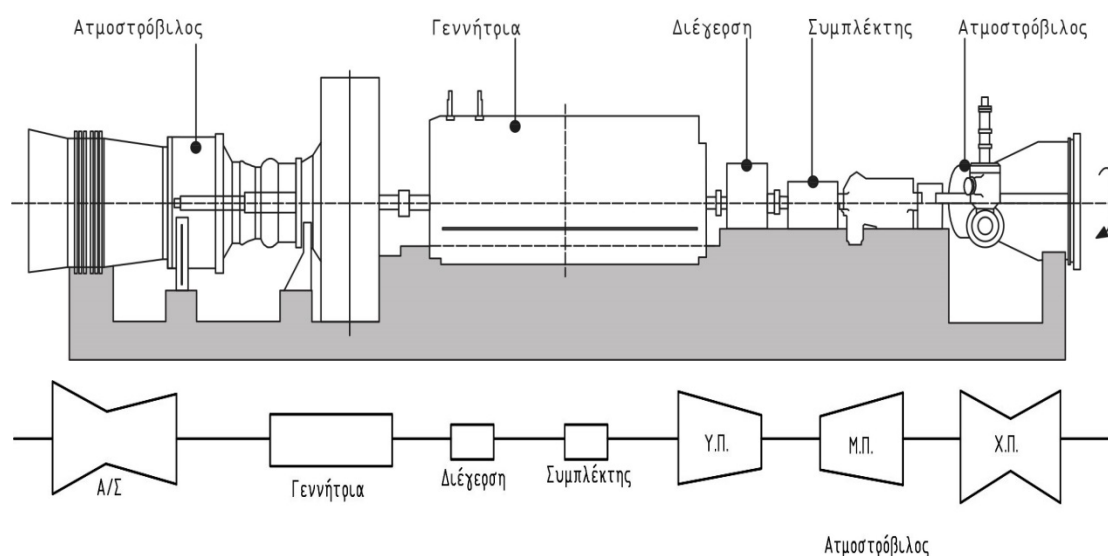
τροφοδοτικών αντλιών θερμαίνεται σε θερμοκρασία κοντά στον κορεσμό από τον απαερωτή και τον οικονομητήρα και εν συνεχεία οδηγείται στον ατμοποιητή όπου και παράγεται ατμός σταθερής θερμοκρασίας. Ο ατμός συνεχίζει προς τον υπερθερμαντή ώστε να φθάσει την επιθυμητή θερμοκρασία και πίεση εισόδου στον ατμοστρόβιλο. Ο ατμοστρόβιλος διαθέτει παρακαμπτήριο αγωγό για τον ατμό, που οδηγεί τον τελευταίο κατευθείαν στον συμπυκνωτή, όταν η τροφοδοσία του στροβίλου δεν καθίσταται δυνατή. Το συμπυκνωμένο νερό οδηγείται με αντλίες στον απαερωτή και εν συνεχεία στο λέβητα ανακτήσεως θερμότητας. Για την θέρμανση του νερού στο απαερωτή χρησιμοποιείται ατμός εκ του ατμοστροβίλου.

Ο ιδανικός λέβητας ανακτήσεως θα πρέπει να πληροί τις παρακάτω, ορισμένες φορές αντιφατικές μεταξύ τους, συνθήκες:

- Μέγιστη αξιοποίηση αποβαλλόμενης θερμότητας καυσαερίων (υψηλή απόδοση).
- Η πτώση πίεσης στη πλευρά των καυσαερίων πρέπει να είναι μικρή ώστε να αποφευχθούν απώλειες ισχύος και μείωση της αποδόσεως του αεριοστροβίλου.
- Πρέπει να αποφευχθεί η διάβρωση που προκαλείται από χαμηλές θερμοκρασίες.
- Ο επιτρεπόμενος ρυθμός ανόδου της πίεσης και της θερμοκρασίας κατά την εκκίνηση πρέπει να είναι υψηλός, ώστε η εκκίνηση να είναι ταχεία.

3.5 Γενικά στοιχεία μονάδος

Στη παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση σύγχρονου συγκροτήματος συνδυασμένου κύκλου με έναν άξονα, συνολικής καθαρής ισχύος 425 MW, συνδεδεμένου στους ζυγούς του άπειρου δικτύου με ονομαστική τάση 400 kV. Η διάταξη του σταθμού συνιστάται ενός αεριοστροβίλου, μιας γεννήτριας και ενός ατμοστροβίλου επί ενός άξονος, ενός Μ/Σ ανυψώσεως και ενός Μ/Σ βοηθητικών μονάδος.



Σχήμα 3.7: Σχέδιο & σκαρίφημα γραμμής άξονα σταθμού παραγωγής συνδυασμένου κύκλου^{3.7}

Ο αεριοστρόβιλος είναι ισχύος 260 MW, διαθέτει την δυνατότητα καύσεως φυσικού αερίου και πετρελαίου και έχει σχεδιασθεί για χρήση σε μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Ο ατμοστρόβιλος περιλαμβάνει τρία κελύφη (υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης). Ο Μ/Σ ανυψώσεως συνδέει τη γεννήτρια με γειτνιάζοντα υποσταθμό Υ.Τ., μέσω υπόγειων καλωδίων ισχύος. Από τον υποσταθμό εκκινούν δύο εναέρια γραμμές μεταφοράς, οι οποίες συνδέονται με το άπειρο δίκτυο των 400 kV.

Πίνακας 2 - Σταθερές αδράνειας στρεφόμενου συγκροτήματος σταθμού παραγωγής

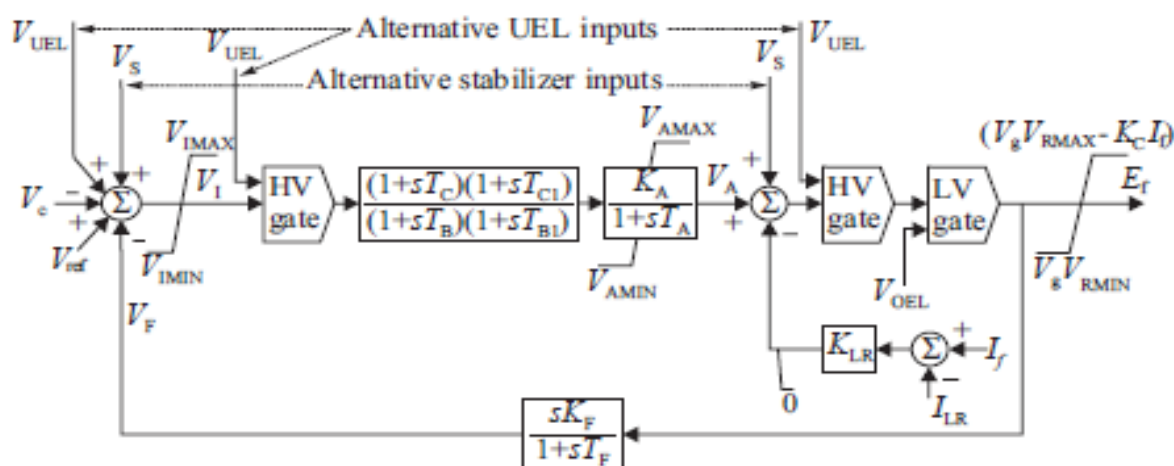
	Α/Σ	Γεννήτρια	Διέγερ- της	Συμπ- λέκτης	Ατμοστρόβιλος			Σ _{CCPP}
					Κέλυφος Υ.Π.	Κέλυφος Μ.Π.	Κέλυφος Χ.Π.	
J (kg*m ²)	45313	7965	110	295	444	1370	25220	80717
H (s)	4,472	0,786	0,011	0,029	0,044	0,135	2,489	7,966

J: η ροπή αδράνειας στρεφόμενης μάζας σε kg*m²

H: η σταθερά αδράνειας στρεφόμενης μάζας σε s

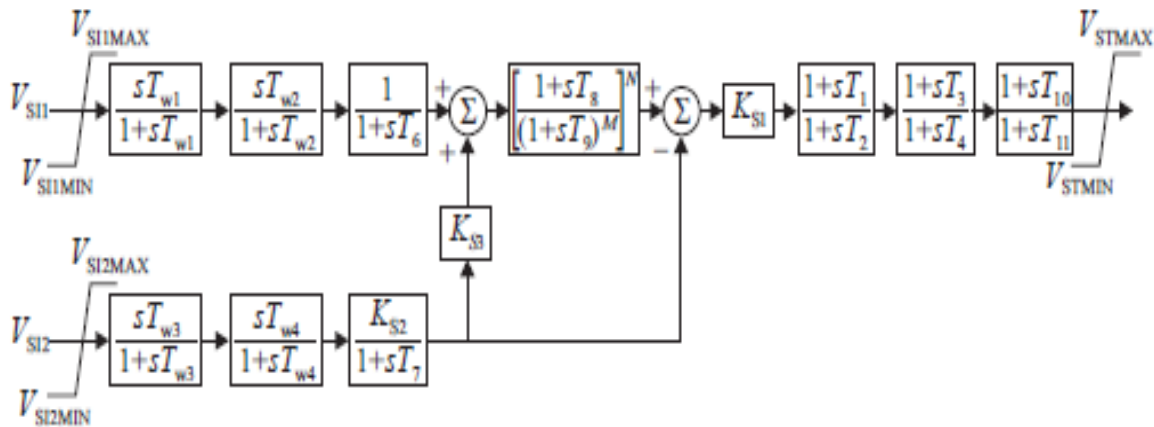
3.5.1 Γεννήτρια Ε.Ρ.

Η γεννήτρια είναι μια σύγχρονη μηχανή ικανότητας 21 kV / 500 MVA και ονομαστικού συντελεστή ισχύος $\cos\phi=0.85$. Το σύστημα διεγέρσεως και ρυθμίσεως τάσεως της γεννήτριας (AVR) βασίζεται στο μοντέλο διεγέρτη IEEE ST1A, το διάγραμμα βαθμίδων του οποίου παρατίθεται στο σχ. 3.8. Η τροφοδοσία του τυλίγματος διεγέρσεως της σύγχρονης γεννήτριας πραγματοποιείται μέσω στατού μετατροπέα Ε.Ρ./Σ.Ρ. (πλήρως ελεγχόμενης ανορθωτικής διατάξεως) τροφοδοτούμενου μέσω Μ/Σ από την τάση εξόδου της αυτοδιεγειρόμενης γεννήτριας.



Σχήμα 3.8: Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος διεγέρσεως τύπου IEEE ST1A^{3.8}

Ο σταθεροποιητής συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (PSS), ο οποίος συνεισφέρει στην απόσβεση των ηλεκτρομηχανικών ταλαντώσεων που εκδηλώνονται ανάμεσα στη γεννήτρια και το υπόλοιπο σύστημα, βασίζεται στο τύπο σταθεροποιητή IEEE PSS2B ενώ το διάγραμμα βαθμίδων του παρατίθεται στο σχ. 3.9. Αυτό το μοντέλο σταθεροποιητή ισχύος είναι σχεδιασμένο ώστε να αναπαριστά μια σειρά από σταθεροποιητές δύο εισόδων-μίας εξόδου, οι είσοδοι των οποίων είναι συνήθως η ταχύτητα ή η συχνότητα και η ηλεκτρική ισχύς.



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα βαθμίδων σταθεροποιητή τύπου PSS2B^{3.9}

Ο ουδέτερος κόμβος των τυλιγμάτων στάτη της γεννήτριας γειώνεται μέσω μεγάλης ωμικής αντιστάσεως, $R_N = 1050 \Omega$. Με αυτό τον τρόπο περιορίζεται δραστικά η ένταση βραχυκυκλώσεως όσον αφορά μονοφασικό σφάλμα σε ακροδέκτη της γεννήτριας.

Τα ονομαστικά στοιχεία της σύγχρονης γεννήτριας στη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, καθώς και σε κατάσταση σφάλματος, δίδονται από τον κατασκευαστή ύστερα από σειρά ελέγχων και υπολογισμών. Οι τιμές αναγράφονται στο Πίνακα 3.

Πίνακας 3 - Δεδομένα Σύγχρονης Γεννήτριας

A/A	Κύρια χαρακτηριστικά γεννήτριας	Μέγεθος	Τιμή	Μονάδα
1.1	Τύπος γεννήτριας	—	TG2 ¹⁾	—
1.2	Ονομαστική φαινόμενη ισχύς	S_{rG}	500	MVA
1.3	Ονομαστική ένταση γραμμής	I_{rG}	13.746	kA
1.4	Ονομαστική τάση ακροδεκτών	U_{rG}	21	kV
1.5	Κορεσμένη τιμή σύγχρονης αντιδράσεως ευθέος άξονα	$x_{d,sat}$	1.89	α.μ.
1.6	Μη κορεσμένη τιμή σύγχρονης αντιδράσεως ευθέος άξονα	x_d	1.95	α.μ.
1.7	Κορεσμένη τιμή υπομεταβατικής αντιδράσεως ευθέος άξονα	x''_d	0.204	α.μ.
1.8	Μη κορεσμένη τιμή σύγχρονης αντιδράσεως εγκάρσιου άξονα	x_q	1.87	α.μ.

1.9	Κορεσμένη τιμή αντιδράσεως αρνητικής ακολουθίας	$x_{(2)G}$	0.208	α.μ.
1.10	Κορεσμένη τιμή αντιδράσεως μηδενικής ακολουθίας	$x_{(0)G}$	0.087	α.μ.
1.11	Ωμική αντίσταση θετικής ακολουθίας	r_G	0.0026	α.μ.
1.12	Ωμική αντίσταση αρνητικής ακολουθίας	$r_{(2)G}$	0.0245 ²⁾	α.μ.
1.13	Ωμική αντίσταση μηδενικής ακολουθίας	$r_{(0)G}$	0.001 ²⁾	α.μ.
1.14	Ρεύμα διεγέρσεως αντιστοιχών στην ονομαστική τάση γεννήτριας εν κενώ	I_f	1622	A

1) Στροβιλογεννήτρια δύο πόλων

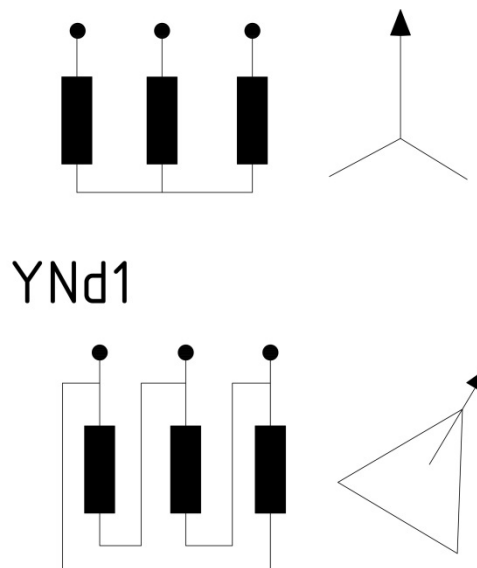
2) Τιμή στους 95°C

Η μετατροπή των επαγωγικών αντιδράσεων και των ωμικών αντιστάσεων από το ανά μονάδα σύστημα στην απόλυτη τιμή τους, απαιτεί γνώση της βασικής τιμής σύνθετης αντιστάσεως γεννήτριας, $Z_{G,base}$. Το μέτρο αυτής ισούται με:

$$Z_{G,base} = \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0.882 \, \Omega \quad (3-1)$$

3.5.2 Μ/Σ μονάδος

Ο Μ/Σ ανυψώσεως είναι τριφασικός, εξωτερικού τύπου με ονομαστική ισχύ $S = 500\text{MVA}$ και σύστημα ψύξεως εξαναγκασμένης κυκλοφορίας εσωτερικού (λαδιού) και εξωτερικού ψυκτικού μέσου (αέρα). Η ονομαστική σχέση τάσεων είναι η $t_r = 400/21\text{kV}$ και ρυθμίζεται μέσω συστήματος αλλαγής τάσεως υπο φορτίο (ΣΑΤΥΦ). Το ΣΑΤΥΦ διαθέτει 19 θέσεις, επιτρέποντας μια ρύθμιση της τάσεως του δευτερεύοντος τυλίγματος μεταξύ -12.5% και +10% με βήμα 1.25% ανά θέση, σε σχέση με την ονομαστική τάση του πρωτεύοντος. Η τάση βραχυκυκλώσεως είναι $u_{kr} = 18.177\%$ και η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων YNd1, ήτοι το πρωτεύον είναι συνδεδεμένο κατά αστέρα με τον κοινό κόμβο συνδεδεμένο απευθείας με τη γη ενώ το δευτερεύον κατά τρίγωνο.



Σχήμα 3.10: Συνδεσμολογία τυλιγμάτων Μ/Σ ανυψώσεως^{3.10}

Όσον αφορά τον Μ/Σ μονάδος, οι ονομαστικές τιμές του λαμβάνονται μέσω των εργοστασιακών δοκιμών ποιοτικού ελέγχου (FAT). Οι τιμές που δόθηκαν από τον κατασκευαστή αναγράφονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4 - Δεδομένα Μ/Σ μονάδος

Τύλιγμα Μ/Σ	Ονομαστική ισχύς	Ονομαστική τάση	Ονομαστική τάση β/κ	Απώλειες β/κ	Ωμική συνιστώσα τάσεως β/κ	Επαγωγική συνιστώσα τάσεως β/κ
	S_{rT}	U_{rT}	u_{kr}	P_{krT}	u_{Rr}	u_{Xr}
	MVA	kV	%	MW	%	%
Υ.Τ.	500	400	18,177	1,00688	0,2014	18,1759
Χ.Τ.		21				

Συνδεσμολογία τυλιγμάτων		Γειωμένο Τύλιγμα	Αντίδραση μηδενικής ακολουθίας $X_{(0)T}/X_{(1)T}$	Σημειώσεις
Υ.Τ.	Χ.Τ.			
YNd1		Υ.Τ.	≈ 1	Πεντασκελής, τύπου πυρήνα

Η ωμική και η επαγωγική συνιστώσα της τάσεως βραχυκυκλώσεως υπολογίζονται ως εξής:

$$u_{Rr\%} = 100 \frac{P_{krT}}{S_{rT}} = 100 \frac{1,00688 \text{ MW}}{500 \text{ MVA}} = 0,2014\% \quad (3-2)$$

και

$$u_{Xr\%} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \approx 18,176\% \quad (3-3)$$

όπου

S_{rT} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του Μ/Σ,

P_{krT} είναι οι απώλειες βραχυκυκλώσεως του Μ/Σ, υπό 75 °C & στο ονομαστικό φορτίο S_{rT} και στην κύρια (μεσαία) θέση του ΣΑΤΥΦ και

u_{kr} είναι η τάση βραχυκυκλώσεως, για ονομαστικό ρεύμα, τοις εκατό.

3.5.3 Μ/Σ βοηθητικών μονάδος

Ο Μ/Σ βοηθητικών μονάδος είναι τριφασικός, λαδιού και τριών τυλιγμάτων (Α/Β/Σ). Τροφοδοτεί τα βοηθητικά φορτία του σταθμού καθώς και τον εκκινητή της στροβιλογεννήτριας. Η συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του είναι ΥΝγ0γ0, η ονομαστική σχέση των τάσεων είναι 21/6.3/5.6 kV (Α/Β/Σ), η ονομαστική φαινόμενη ισχύς είναι 36/15.8/20.2 MVA (Α/Β/Σ) και η τάση βραχυκυκλώσεως είναι 7.44/8.64/17.5 % (ΑΒ/ΑΣ/ΒΣ), σε βάση φαινόμενης ισχύος 15.8/20.2/15.8 MVA, αντίστοιχα.

Οι ονομαστικές τιμές του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος λαμβάνονται απο εργοστασιακές δοκιμές ποιοτικού ελέγχου (FAT). Οι τιμές που δόθηκαν από τον κατασκευαστή αναγράφονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5 - Δεδομένα Μ/Σ βοηθητικών φορτίων μονάδος

Ονομαστική τάση τυλίγματος			Ονομαστική ισχύς τυλιγμάτων			Ονομαστική τάση Β/Κ (ως προς την τάση U_{rTA})			Ωμική Συνιστώσα Τάσεως Βραχυκυκλώσεως		
U_{rTA}	U_{rTB}	U_{rTC}	S_{rTAB}	S_{rTAC}	S_{rTBC}	u_{krAB}	u_{krAC}	u_{krBC}	u_{RrAB}	u_{RrAB}	u_{RrAB}
kV			MVA			%					
21	6.3	5.6	15.8	20.2	15.8	7.44	8.64	17.5	0.398	0.329	0.678
			Συνδεσμολογία Τυλιγμάτων			Σημειώσεις / Παρατηρήσεις					
			A	B	C	Τρισκελής, τύπου πυρήνος, ελλiπή στοιχεία όσον αφορά της δοκιμές μηδενικής ακολουθίας					
			—								
			YNy0y0								

Οι ωμικές συνιστώσες της τάσεως βραχυκυκλώσεως, u_{Rr} , υπολογίζονται μέσω των απωλειών βραχυκυκλώσεως P_{krT} . Η μέτρηση των απωλειών βραχυκυκλώσεως γίνεται με την εφαρμογή ημιτονοειδούς τάσεως ονομαστικής συχνότητας στο υπο μέτρηση τύλιγμα, έχοντας το δεύτερο τύλιγμα βραχυκυκλωμένο και το τρίτο ανοιχτοκυκλωμένο. Το ρεύμα που θα διαρρέει το υπό μέτρηση τύλιγμα πρέπει να ισούται της ονομαστικής τιμής εντάσεως του τυλίγματος η οποία, παραδείγματος χάρη, για το τύλιγμα Α των 21 kV ισούται με:

$$I_{rA} = \frac{S_{rTAB}}{\sqrt{3}U_{rTA}} \quad (3-4)$$

3.5.4 Βοηθητικά φορτία μονάδος

Τα βοηθητικά φορτία που λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία συνίστανται απο κινητήρες ονομαστικής ισχύος μεγαλύτερης των 100 kW. Κινητήρες μικρότερης ισχύος δεν θεωρείται ότι έχουν πρακτική συνεισφορά στην

ένταση βραχυκυκλώσεως ή επιρροή στην μεταβατική συμπεριφορά του σφάλματος. Προκειμένου να βρισκόμαστε στην ασφαλή πλευρά των αποτελεσμάτων, όσον αφορά τους υπολογισμούς της εντάσεως βραχυκυκλώσεως, θεωρούμαι ότι όλοι οι κινητήρες λειτουργούν στο ονομαστικό τους φορτίο. Η παραπάνω παραδοχή γίνεται ώστε να έχουμε την μέγιστη δυνατή συνεισφορά στρεφόμενων φορτίων, τροφοδοτούμενων από τους ζυγούς Μ.Τ. & Χ.Τ. Ωστόσο δεν λαμβάνονται υπόψη κινητήρες που, λόγω της διαδικασίας ή λόγω οποιασδήποτε αλληλομανδαλώσεως, δεν δύνανται να λειτουργήσουν ταυτόχρονα με άλλους κινητήρες. Η συνολική πραγματική ισχύς που καταναλώνουν τα βοηθητικά φορτία θεωρείται ίση με 11.4 MW και η συνολική άεργος ισχύς ίση με 6.2 Mvar. Οι κινητήρες Μ.Τ. & Χ.Τ. καθώς και η περιγραφή του μηχανικού φορτίου τους σημειώνονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6 – Κινητήρες ισχύος μεγαλύτερης των 100 MW

A/A	Τάση	Μηχανικό Φορτίο / Περιγραφή
M1	Μ.Τ.	Αντλία συμπυκνώματος
M2		Τροφοδοτική αντλία
M3		Συμπιεστής αερίου
M4		Αντλία ψυκτικού ύδατος 1 (ανοιχτού κυκλώματος)
M5		Αντλία ψυκτικού ύδατος 2 (ανοιχτού κυκλώματος)
M6		Αντλία απαερωτή προθέρμανσης
M7	Χ.Τ.	Αντλία δημιουργίας κενού 1
M8		Αντλία υψηλής πίεσης (1)
M9		Αντλία υψηλής πίεσης (2)
M10		Αντλία υψηλής πίεσης (3)
M11		Αντλία υψηλής πίεσης (4)
M12		Αντλία ψυκτικού ύδατος 1 (κλειστού κυκλώματος)

Τα δεδομένα των ασύγχρονων κινητήρων λαμβάνονται από τους κατασκευαστές. Στους Πίνακες 9 & 10, βλέπε κεφάλαιο 4 παρακάτω, αναγράφονται τα ονομαστικά στοιχεία των κινητήρων Μ.Τ. & Χ.Τ., σύμφωνα με τις ενδείξεις που αυτοί έχουν στο Πίνακα 2 και στο σχ. 3-11. Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909-0 οι κινητήρες Χ.Τ. μπορούν να συνδυαστούν σε ένα ισοδύναμο κινητήρα, ενώ παράλληλα προτείνονται και τιμές για τις παραμέτρους αυτού, τις οποίες ακολουθήσαμε ελλείψει άλλων στοιχείων. Μαζί με τους κινητήρες Χ.Τ. λαμβάνονται υπόψη και οι Μ/Σ υποβιβασμού τάσεως που τροφοδοτούν τα δίκτυα Χ.Τ. της μονάδος ηλεκτροπαραγωγής. Οι Μ/Σ Χ.Τ. είναι ξηρού τύπου, ονομαστικής ισχύος 2 MVA και ο λόγος μετασχηματισμού τους είναι $t_r = 6.3/0.42$ kV.

3.5.5 Το άπειρο δίκτυο των 400 kV

Από τους ζυγούς του υποσταθμού Υ.Τ. αναχωρούν, μέσω διατάξεως δύο ζυγών με ένα διακόπτη ανά αναχώρηση, δύο εναέριες γραμμές διπλού κυκλώματος τύπου 2 x 954 MCM και μήκους 100 km εκάστη, οι οποίες συνδέονται στο δίκτυο των 400 kV μέσω δύο Κέντρων Υ.Τ. (ΚΥΤ).

Σύμφωνα με τα δεδομένα της Επιχείρησης Ηλεκτρισμού για τον ζυγό των 400 kV η μέγιστη ένταση τριφασικού & μονοφασικού σφάλματος, αντίστοιχα, είναι:

$$I''_{kmax,line1} = I''_{kmax,line2} = 20 \text{ kA}$$

και

$$I''_{k1max,line1} = I''_{k1max,line2} = 20 \text{ kA}$$

Εφόσον οι δύο γραμμές θεωρούνται παράλληλες, η συνολική ελάχιστη ένταση βραχυκυκλώσεως προκύπτει ως το άθροισμα των δύο γραμμών. Συνεπάγεται ότι:

$$I''_{kmax} = 40 \text{ kA}$$

$$I''_{k1max} = 40 \text{ kA}$$

Αναλόγως οι δεδομένες ελάχιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως στους ζυγούς των 400 kV, όσον αφορά τριφασικό & μονοφασικό βραχυκύκλωμα, δίνονται ίσες με:

$$I''_{kmin,line1} = I''_{kmin,line2} = 4.85 \text{ kA}$$

$$I''_{k1min,line1} = I''_{k1min,line2} = 5 \text{ kA}$$

Η δε συνολική μέγιστη ένταση βραχυκυκλώσεως, θεωρώντας τις δύο γραμμές παράλληλες, ισούται με:

$$I''_{kmin} = 9.7 \text{ kA}$$

$$I''_{k1min} = 10 \text{ kA}$$

3.5.6 Εναέρια γραμμές μεταφοράς

Τα δεδομένα των εναέριων γραμμών λαμβάνονται από την Επιχείρηση Ηλεκτρισμού. Στο Πίνακα 7 αναγράφονται οι ονομαστικές τιμές της μίας εκ των δύο γραμμών, εφόσον αυτές θεωρούνται όμοιες. Για τη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα παρόμοιας γραμμής από το IEC 60909-2, [10].

Πίνακας 7 - Δεδομένα εναέριων γραμμών μεταφοράς

Τύπος γραμμής & αριθμός κυκλωμάτων	Ονομαστική τάση	Αριθμός αγωγών	Σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας	Σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας
(Σχήμα 8, IEC 60909-2)	U_n	Υλικο, q_n	$\underline{Z}'_{(1)} = R'_{(1)} + jX'_{(1)}$	$\underline{Z}'_{(0)} = R'_{(0)} + jX'_{(0)}$
—	kV	mm ²	Ω/km	Ω/km
D/1	400	ASCR, 2 x 483	0.03074 + j0.3052	—

*Η ωμική αντίσταση για θερμοκρασία 20 °C

3.6 Μονογραμμικό διάγραμμα μονάδος

Στο σχ. 3.11 αναπαριστάται το μονογραμμικό διάγραμμα της ηλεκτρολογικής εγκαταστάσεως του σταθμού παραγωγής. Η σύγχρονη γεννήτρια συνδέεται με το Μ/Σ ανυψώσεως μέσω διακόπτη ισχύος. Ο Μ/Σ βοηθητικών μονάδος με το δευτερεύων στα 6.3 kV τροφοδοτεί τους ζυγούς Α & Β. Το δε δευτερεύων στα 5.6 kV χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία της στατής μονάδος εκκινήσεως της σύγχρονης γεννήτριας (SSD). Ο ζυγός τροφοδοτήσεως βοηθητικών φορτίων Α συνδέεται με τον εφεδρικό ζυγό Β μέσω συσκευής μεταφοράς ζυγού υψηλής ταχύτητας (BTD). Ο ζυγός Β αποτελεί τον εφεδρικό του ζυγού Α και δεν λαμβάνεται υπόψη στην μελέτη βραχυκυκλώματος. Τέλος, τα σημεία F1 έως και F4 αντιστοιχούν στις θέσεις σφάλματος της μελέτης βραχυκυκλώσεως.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων κατά IEC 60909

4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται βήμα προς βήμα ο υπολογισμός των σύνθετων αντιστάσεων βραχυκυκλώσεως των επιμέρους στοιχείων της ηλεκτρολογικής εγκαταστάσεως του σταθμού παραγωγής συνδυασμένου κύκλου, η βασική τοπολογία του οποίου αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια πραγματοποιείται αναλυτικός υπολογισμός των εντάσεων βραχυκυκλώσεως δύο περιπτώσεων σφάλματος, τριφασικού και μονοφασικού με γη, στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου και στους ακροδέκτες της γεννήτριας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα εξαγόμενα του λογισμικού NEPLAN και αφού αποδειχθεί η συμφωνία τους προχωράμε σε σειρά υπολογισμών, μέσω του λογισμικού, για διάφορους τύπους σφαλμάτων σε διάφορα σημεία της εγκαταστάσεως, βλέπε θέσεις F1 έως F4 στο σχ. 3.11 ανωτέρω.

4.2 Υπολογισμός σύνθετων αντιστάσεων βραχυκυκλώσεως επιμέρους συνιστωσών

4.2.1 Δίκτυο τροφοδοσίας

Σύμφωνα με την παράγραφο 3.2 του [1] και τα δεδομένα της Επιχείρησης Ηλεκτρισμού, το μέτρο της ελάχιστης σύνθετης αντιστάσεως βραχυκυκλώσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας του δικτύου τροφοδοτήσεως στο σημείο συνδέσεως Q, υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$Z_{Q\min} = \frac{c_{\max} U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQ\max}} = 1.1 \frac{400 \text{ kV}}{\sqrt{3} 40 \text{ kA}} = 6.35085 \Omega \quad (4-1)$$

όπου

U_{nQ} είναι η ονομαστική πολική τάση του συστήματος στο σημείο συνδέσεως Q με το δίκτυο τροφοδοτήσεως και

$c_{\max}$ είναι ο μέγιστος συντελεστής τάσεως, βλέπε Πίνακα 1 ανωτέρω, που αντιστοιχεί στην τάση U_{nQ} .

Περαιτέρω εάν ο λόγος του ωμικού προς το επαγωγικό μέρος της σύνθετης αντιστάσεως του δικτύου τροφοδοτήσεως, R_Q/X_Q , είναι γνωστός, τότε υπολογίζουμε:

$$X_Q = \frac{Z_Q}{\sqrt{1+(R_Q/X_Q)^2}} \quad (4-2)$$

Όσον αφορά δίκτυα τροφοδοτήσεως με εναέριες γραμμές και ονομαστικής τάσεως άνω των 35 kV, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση $\underline{Z}_Q$ μπορεί να θεωρηθεί ίση με τη τιμή της επαγωγικής συνιστώσας της, X_Q . Εν τούτοις, θεωρούμε ότι $R_Q/X_Q \approx 0.1$. Από την εξ. 4-2 προκύπτει ότι:

$$X_Q = \frac{6.35085 \, \Omega}{\sqrt{1+(0.1)^2}} = 6.31933 \, \Omega$$

και

$$R_Q = 0.1X_Q = 0.63193 \, \Omega$$

Άρα η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως, $\underline{Z}_{Qmin}$, θετικής και αρνητικής ακολουθίας του δικτύου τροφοδοτήσεως, σε μιγαδική μορφή, ισούται με:

$$\underline{Z}_{Qmin} = (0.63193 + j6.31933)\Omega$$

Αναλόγως, το μέτρο της μέγιστης σύνθετης αντιστάσεως βραχυκυκλώσεως, Z_{Qmax} , θετικής και αρνητικής ακολουθίας του δικτύου τροφοδοτήσεως ισούται με:

$$Z_{Qmax} = \frac{c_{min} U_{nQ}}{\sqrt{3} I''_{kQmin}} = 1 \frac{400 \, \text{kV}}{\sqrt{3} 9.7 \, \text{kA}} = 23.80826 \, \Omega$$

και σε μιγαδική μορφή:

$$\underline{Z}_{Qmax} = (2.36901 + j23.6901)\Omega$$

Η ελάχιστη ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως μηδενικής ακολουθίας, $Z_{(0)Qmin}$, δικτύου τροφοδοτήσεως, στο σημείο συνδέσεως Q, με δεδομένη τη μέγιστη ένταση βραχυκυκλώσεως μονοφασικού σφάλματος, I''_{k1Qmax} , υπολογίζεται ως εξής:

$$I''_{k1Qmax} = \frac{\sqrt{3} c_{max} U_{nQ}}{|2\underline{Z}_{Qmin} + \underline{Z}_{(0)Qmin}|} \quad (4-3)$$

Γνωρίζουμε ότι οι μέγιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως μονοφασικού και τριφασικού σφάλματος είναι ίσες, βλέπε παράγραφο 3.5.5 ανωτέρω. Σύμφωνα με τις εξ. 4.1 & 4.3 ισχύει ότι:

$$I''_{kQ\max} = I''_{k1Q\max} \Leftrightarrow \frac{c_{\max} U_{nQ}}{\sqrt{3} Z_{Q\min}} = \frac{\sqrt{3} c_{\max} U_{nQ}}{|2\underline{Z}_{Q\min} + \underline{Z}_{(0)Q\min}|}$$

Συνεπάγεται ότι $|2\underline{Z}_{Q\min} + \underline{Z}_{(0)Q\min}| = 3Z_{Q\min}$, επομένως οι σύνθετες αντιστάσεις μηδενικής και θετικής ακολουθίας είναι ίσες μεταξύ τους.

Αναλόγως, το μέτρο της μέγιστης ισοδύναμης σύνθετης αντιστάσεως βραχυκυκλώσεως μηδενικής ακολουθίας, $Z_{(0)Q\max}$, του δικτύου τροφοδοτήσεως ισούται με:

$$Z_{(0)Q\max} = 21,66552 \Omega$$

και σε μιγαδική μορφή:

$$\underline{Z}_{(0)Q\max} = (2.15579 + j21.55799) \Omega$$

4.2.2 Εναέρια γραμμές των 400 kV

Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας εκάστης των δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς 1 & 2, για θερμοκρασία 20°C, έχει δοθεί από τον κατασκευαστή και είναι ίση με:

$$\underline{Z}_{\text{line1}} = \underline{Z}_{\text{line2}} = (0.03074 + j0.3052) \Omega/\text{km}$$

Η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση ακολουθίας και των δύο παράλληλων γραμμών ισούται με:

$$\underline{Z}_{L\min} = \frac{1}{2} \times (0.03074 + j0.3052) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 100\text{km} = (1.537 + j15.26) \Omega$$

Όσον αφορά την σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας, ελλείψει σχετικών στοιχείων, ακολουθούμε την τιμή που προτείνει το [10] για την ανάλογη γραμμή D/1^{4.1}:

$$\underline{Z}_{(0)\text{line1}} = \underline{Z}_{(0)\text{line2}} = (0.233 + j0.715) \Omega/\text{km}$$

Η ελάχιστη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας και των δύο γραμμών ισούται με:

$$\underline{Z}_{(0)L\min} = \frac{1}{2} \times (0.233 + j0.715) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 100\text{km} = (11.65 + j35.75) \Omega$$

Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας εκάστης των δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς 1 & 2, για θερμοκρασία 80°C, υπολογίζεται μέσω της εξ. 2-1:

$$\underline{Z}_{\text{line1}} = \underline{Z}_{\text{line2}} = (0.03074 [1 + 0.004(80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})] + j0.3052) \Omega/\text{km} \Leftrightarrow$$

$$\underline{Z}_{\text{line1}} = \underline{Z}_{\text{line2}} = (0.03812 + j0.3052) \Omega/\text{km}$$

Η μέγιστη σύνθετη αντίσταση και των δύο γραμμών ισούται με:

$$\underline{Z}_{\text{Lmax}} = \frac{1}{2} \times (0.03812 + j0.3052) \frac{\Omega}{\text{km}} \times 100\text{km} = (1.90588 + j15.26) \Omega$$

Αναλόγως η μέγιστη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας και των δύο γραμμών ισούται με:

$$\underline{Z}_{(0)\text{Lmax}} = (14.446 + j35.75) \Omega$$

4.2.3 Σύγχρονη γεννήτρια

Σύμφωνα με τις παραγράφους 3.6.1 & 3.7.1 του [1], η υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως θετικής ακολουθίας της γεννήτριας υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_G = R_G + jX''_d \quad (4-4)$$

με την ωμική συνιστώσα της να ισούται με:

$$R_G = r_G \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,0026 \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 0.00229 \Omega$$

όπου

U_{rG} είναι η ονομαστική τάση ακροδεκτών της γεννήτριας,

S_{rG} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς της γεννήτριας και

r_G είναι η σχετική ωμική αντίσταση της γεννήτριας, βλέπε Πίνακα 3.

Αναλόγως, η υπομεταβατική επαγωγική συνιστώσα της ισούται με την κορεσμένη τιμή της υπομεταβατικής αντιδράσεως της γεννήτριας:

$$X''_d = x''_d \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,204 \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 0.17993 \Omega$$

όπου

x''_d είναι η σχετική υπομεταβατική αντίδραση της γεννήτριας, βλέπε Πίνακα 3.

Συνεπάγεται ότι:

$$\underline{Z}_G = (0.00229 + j0.17993) \Omega$$

Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως αρνητικής ακολουθίας της γεννήτριας υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_{(2)G} = R_{(2)G} + jX_{(2)G} \quad (4-5)$$

με την ωμική συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας $R_{(2)G}$ να ισούται με:

$$R_{(2)G} = r_{(2)G} \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,0245 \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 0.02161 \Omega$$

όπου

$r_{(2)G}$ είναι η σχετική ωμική αντίσταση αρνητικής ακολουθίας της γεννήτριας, βλέπε Πίνακα 3.

Αναλόγως, η επαγωγική συνιστώσα αρνητικής ακολουθίας $X_{(2)G}$ ισούται με την κορεσμένη τιμή αντιδράσεως αρνητικής ακολουθίας της γεννήτριας:

$$X_{(2)G} = x_{(2)G} \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,208 \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 0.18346 \Omega$$

όπου

$x_{(2)G}$ είναι η σχετική αντίδραση αρνητικής ακολουθίας της γεννήτριας, βλέπε Πίνακα 3.

Συνεπάγεται ότι:

$$\underline{Z}_{(2)G} = (0.02161 + j 0.18346) \Omega$$

Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως μηδενικής ακολουθίας της γεννήτριας υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_{(0)G} = R_{(0)G} + jX_{(0)G}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο ωμικό μέρος της ολικής σύνθετης αντιστάσεως μηδενικής ακολουθίας της σύγχρονης γεννήτριας θα πρέπει να προστεθεί όρος ίσος με τρείς φορές την αντίσταση γειώσεως, $R_N = 1050 \Omega$, του ουδέτερου κόμβου της γεννήτριας. Συνεπάγεται ότι:

$$\underline{Z}_{(0)G} = R_{(0)G} + jX_{(0)G} + 3R_N \quad (4-6)$$

με την ωμική συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας $R_{(0)G}$ να ισούται με:

$$R_{(0)G} = r_{(0)G} \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,00102 \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 0.00089 \Omega$$

όπου

$r_{(0)G}$ είναι η σχετική ωμική αντίσταση μηδενικής ακολουθίας της γεννήτριας, βλέπε Πίνακα 3.

Η επαγωγική συνιστώσα μηδενικής ακολουθίας ισούται με την κορεσμένη τιμή αντιδράσεως μηδενικής ακολουθίας της γεννήτριας:

$$X_{(0)G} = x_{(0)G} \frac{U_{rG}^2}{S_{rG}} = 0,087 \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 0.07673 \Omega$$

όπου

$x_{(0)G}$ είναι η σχετική αντίδραση μηδενικής ακολουθίας της γεννήτριας, βλέπε Πίνακα 3.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$\underline{Z}_{(0)G} = (0.00089 + j0.07673) \Omega + 3150 \Omega$$

Για τον υπολογισμό της τιμής κορυφής i_p , το πρότυπο IEC 60909 εισάγει την πλασματική ωμική αντίσταση R_{Gf} . Όσον αφορά σύγχρονη γεννήτρια με ονομαστική τάση $U_{rG} > 1 \text{ kV}$ και ονομαστική φαινόμενη ισχύ $S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$, η πλασματική ωμική αντίσταση R_{Gf} ισούται με:

$$R_{Gf} = 0,05X''_d \quad (4-7)$$

και η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως της γεννήτριας με πλασματική ωμική αντίσταση είναι ίση με:

$$\underline{Z}_{Gf} = (0.00899 + j0.17993) \Omega$$

Το πρότυπο IEC 60909 επίσης εισάγει το συντελεστή διορθώσεως K_G λόγω της χρήσεως της ισοδύναμης πηγής τάσεως $cU_n/\sqrt{3}$ αντί της υπομεταβατικής τάσεως E'' προ της υπομεταβατικής αντιδράσεως X''_d . Ο συντελεστής διορθώσεως K_G υπολογίζεται μέσω της παρακάτω σχέσεως:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \frac{c_{\max}}{1+x''_d \sin \varphi_{rG}} = \frac{21 \text{ kV}}{21 \text{ kV}} \frac{1.1}{1+0.204 \times 0.527} = 0.9933 \quad (4-8)$$

όπου

U_{nQ} είναι η ονομαστική τάση του συστήματος στο σημείο συνδέσεως, Q , της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος με το δίκτυο τροφοδοτήσεως και

φ_{rG} είναι η γωνία του ρεύματος γραμμής I_{rG} ως προς τη φασική τάση $U_{rG}/\sqrt{3}$.

Συνεπάγεται ότι οι τιμές των διορθωμένων σύνθετων αντιστάσεων γεννήτριας ευρίσκονται ως εξής:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = (0.00227 + j0.17872) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(2)GK} = K_G \underline{Z}_{(2)G} = (0.02146 + j0.18223) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)GK} = K_G \underline{Z}_{(0)G} = (3150.00088 + j0.07622) \Omega$$

$$\underline{Z}_{GfK} = K_G \underline{Z}_{Gf} = (0.00893 + j0.17872) \Omega$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι σύμφωνα με το [1]^{4,2}, ο συντελεστής διορθώσεως K_G εφαρμόζεται στα κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας αλλά όχι στην αντίσταση γειώσεως του ουδέτερου κόμβου στάτη της γεννήτριας, R_N .

4.2.4 Μ/Σ μονάδος

Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας του Μ/Σ ανυψώσεως υπολογίζεται σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Z_{TLV} = \frac{u_{kr}}{100} \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{18.177}{100} \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 0.16032 \Omega \quad (4-9)$$

$$R_{TLV} = \frac{u_{Rr}}{100} \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{0.2014}{100} \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = 0.00178 \Omega \quad (4-10)$$

$$X_{TLV} = \sqrt{Z_{TLV}^2 - R_{TLV}^2} = \sqrt{0.16032^2 - 0.00178^2} = 0.16031 \Omega \quad (4-11)$$

όπου

U_{rTHV} είναι η ονομαστική τάση του Μ/Σ στο τύλιγμα Υ.Τ.,

U_{rTLV} είναι η ονομαστική τάση του Μ/Σ στο τύλιγμα Χ.Τ.,

S_{rT} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του Μ/Σ,

P_{krT} είναι οι ολικές απώλειες βραχυκυκλώσεως του Μ/Σ,

u_{kr} είναι η τάση βραχυκυκλώσεως του Μ/Σ, βλέπε Πίνακα 4, και

u_{Rr} είναι η ονομαστική ωμική συνιστώσα της τάσεως βραχυκυκλώσεως, βλέπε Πίνακα 4.

Συνεπάγεται ότι η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας του Μ/Σ ισχύος, ανηγμένη στο τύλιγμα Χ.Τ., είναι ίση με:

$$\underline{Z}_{TLV} = R_{TLV} + jX_{TLV} = (0.00178 + j0.16031) \Omega$$

Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας του Μ/Σ ισχύος, ανηγμένη στο τύλιγμα Υ.Τ., ισούται με:

$$\underline{Z}_{THV} = (R_{TLV} + jX_{TLV}) t_r^2 = (0.64581 + j58.16236) \Omega$$

όπου

t_r^2 είναι το τετράγωνο του ονομαστικού λόγου μετασχηματισμού του Μ/Σ.

Η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας του Μ/Σ ανυψώσεως μετρήθηκε από τον κατασκευαστή και ευρέθη ίση με:

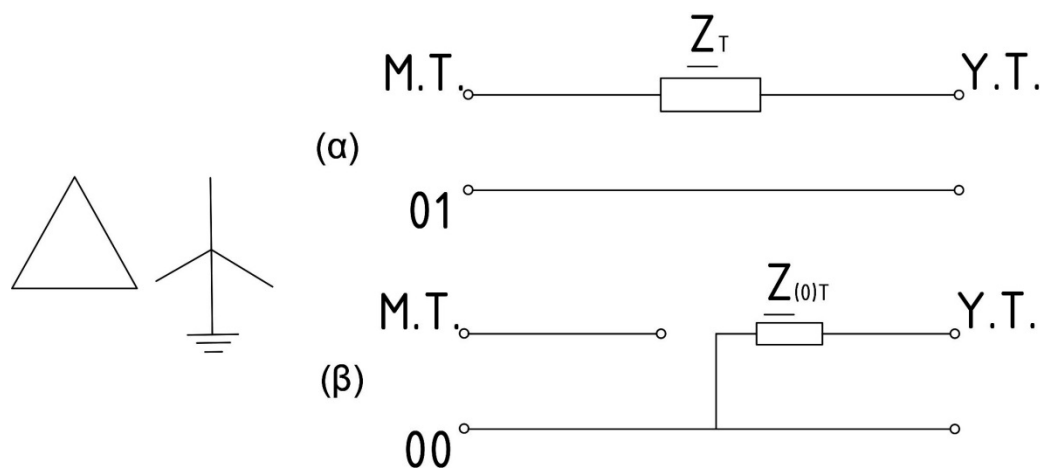
$$\underline{Z}_{(0)TLV} = \frac{u_{(0)Xr}}{100} \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{18.12}{100} \frac{(21 \text{ kV})^2}{500 \text{ MVA}} = j0.15982 \Omega/\text{φάση}$$

και

$$\underline{Z}_{(0)THV} = j57.98458 \Omega/\text{φάση}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι $X_{T(0)} / X_{T(1)} \approx 1$, όπερ γενικότερα ισχύει για μονοφασικούς Μ/Σ. Επομένως καθίσταται δυνατή η προσομοίωση ενός πεντασκελή, τριφασικού Μ/Σ τύπου πυρήνος μέσω τριών ομοίων μονοφασικών.

Τα ισοδύναμα κυκλώματα θετικής και μηδενικής ακολουθίας του Μ/Σ μονάδος φαίνονται στο ακόλουθο σχήμα:



¹⁾ $\underline{Z}_{(1)K} = \underline{K}_T \underline{Z}_{(1)}$; $\underline{K}_T$ from equation (12a) or (12b) of IEC 60909-0.

²⁾ $\underline{Z}_{(0)K} = \underline{K}_T \underline{Z}_{(0)}$, $\underline{K}_T$ from equation (12a) or (12b) of IEC 60909-0; $\underline{Z}_N$ without correction factor.

Σχήμα 4.1: Ισοδύναμα κυκλώματα θετικής, (α), και μηδενικής ακολουθίας, (β),

Μ/Σ μονάδος^{4.3}

4.2.5 Ηλεκτροπαραγωγός μονάδα με ΣΑΤΥΦ

Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας, $\underline{Z}_S$, ηλεκτροπαραγωγού μονάδος με ΣΑΤΥΦ, S, ανηγμένη στο τύλιγμα Υ.Τ. του Μ/Σ μονάδος, υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_S = K_S (\underline{t}_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) \quad (4-12)$$

όπου

$\underline{Z}_S$ είναι η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση μονάδος ηλεκτροπαρα-

- γωγής με ΣΑΤΥΦ, ανηγμένη στο τύλιγμα Υ.Τ. του Μ/Σ μονάδος,
- $\underline{Z}_G$ είναι η υπομεταβατική σύνθετη αντίσταση γεννήτριας ίση με $R_G + jX''_d$,
- $\underline{Z}_{THV}$ είναι η σύνθετη αντίσταση του Μ/Σ μονάδος ανηγμένη στο τύλιγμα Υ.Τ. και
- t_r ο ονομαστικός λόγος μετασχηματισμού του Μ/Σ μονάδος, ήτοι $t_r = U_{rTHV}/U_{rTLV}$.

Το [1] εισάγει το συντελεστή διορθώσεως σύνθετης αντιστάσεως ηλεκτροπαραγωγού μονάδος με ΣΑΤΥΦ, K_S , για τον υπολογισμό του οποίου απαιτείται η γνώση του σημείου λειτουργίας της γεννήτριας, ισχύει δε:

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \frac{c_{\max}}{1 + |x''_d - x_T| \sin \varphi_{rG}} \quad (4-13)$$

όπου

- x_T είναι η σχετική αντίδραση του Μ/Σ μονάδος στη κύρια θέση του ΣΑΤΥΦ, δηλαδή $x_T = X_T/(U_{rT}^2/S_{rT})$.

Ο συντελεστής διορθώσεως K_S θα υπολογιστεί σύμφωνα με την ροή φορτίου για τη περίπτωση λειτουργίας της γεννήτριας υπό πλήρη φαινομένη ισχύ και ονομαστικό συντελεστή ισχύος. Συνεπάγεται ότι:

$$\cos \varphi_{rG} = 0.850$$

Εξ αυτού προκύπτει ότι

$$\sin \varphi_{rG} = 0.527$$

Ως εκ τούτου, ο συντελεστής διορθώσεως K_S ισούται με:

$$K_S = \frac{1,1}{1 + |0.204 - 0.181759| 0.527} = 1.087$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας ηλεκτροπαραγωγού μονάδος, ανηγμένη στο τύλιγμα Υ.Τ. του Μ/Σ μονάδος, ισούται με:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_S &= K_S (t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) = \\ &= 1.087 \left\{ \left(\frac{400}{21} \right)^2 (0.00229 + j0.17993) + 0.64581 + j58.16236 \right\} \Leftrightarrow \\ \underline{Z}_S &= (1.60512 + j134.18263) \Omega \end{aligned}$$

Αναλόγως, η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας ηλεκτροπαραγωγού μονάδος υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_{(2)S} = K_S (t_r^2 \underline{Z}_{(2)G} + \underline{Z}_{THV}) \quad (4-14)$$

Συνεπάγεται ότι η σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας ηλεκτροπαραγωγού μονάδος ισούται με:

$$\underline{Z}_{(2)S} = 1.087 \left\{ \left(\frac{400}{21} \right)^2 (0.02161 + j0.18346) + 0.64581 + j58.16236 \right\} \Leftrightarrow$$

$$\underline{Z}_{(2)S} = (9.22447 + j135.57479) \Omega$$

Τέλος, η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας ηλεκτροπαραγωγού μονάδος είναι ίση με:

$$\underline{Z}_{(0)S} = K_S (t_r^2 \underline{Z}_{(0)G} + \underline{Z}_{(0)THV}) \quad (4-15)$$

Σύμφωνα με το σχ. 4.1 η σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος ισούται με αυτήν του Μ/Σ μονάδος, μιάς και δεν παρέχεται αγωγίμος δρόμος από την πλευρά των 400 kV προς την γεννήτρια λόγω της συνδεσμολογίας (YNd1) του Μ/Σ:

$$\underline{Z}_{(0)S} = K_S \underline{Z}_{(0)THV} = 1.087 j57.98458 = j63.02924 \Omega$$

Για τον υπολογισμό της τιμής κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p απαιτείται η χρήση της σύνθετης αντιστάσεως βραχυκυκλώσεως γεννήτριας με πλάσματική ωμική αντίσταση $\underline{Z}_{Gf}$. Η σύνθετη αντίσταση της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος με ΣΑΤΥΦ με πλάσματική ωμική αντίσταση θα ισούται τότε με:

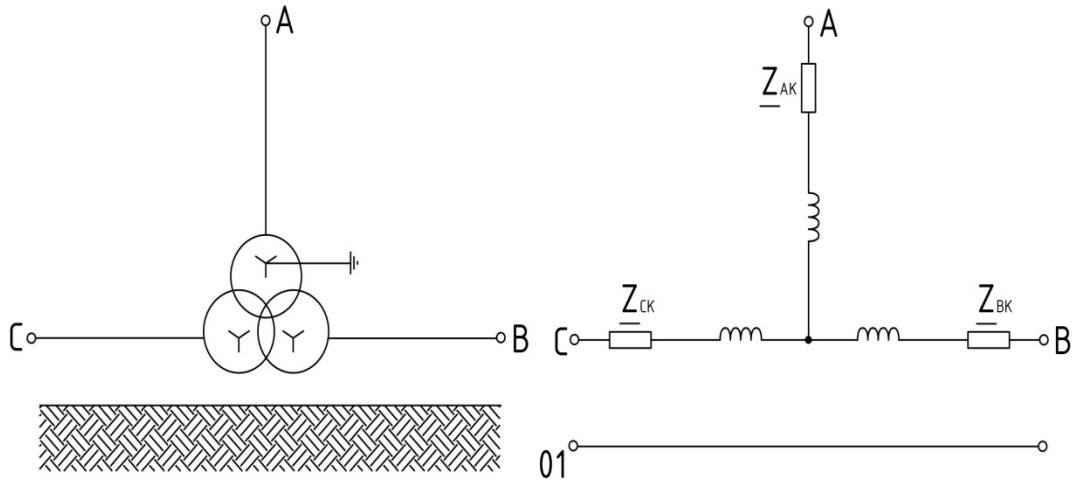
$$\underline{Z}_{Sf} = K_S (t_r^2 \underline{Z}_{Gf} + \underline{Z}_{THV}) =$$

$$= 1.087 \left\{ \left(\frac{400}{21} \right)^2 (0.00899 + j0.17993) + 0.64581 + j58.16236 \right\} \Leftrightarrow$$

$$\underline{Z}_{Sf} = (4.24744 + j134.18263) \Omega$$

4.2.6 Μ/Σ βοηθητικών μονάδος

Ο Μ/Σ βοηθητικών μονάδος, συνδεσμολογίας ΥΝγΟγΟ, διαθέτει τρία τυλίγματα και, σύμφωνα με την παράγραφο 3.3.2 του [1], μπορεί να αναχθεί σε ισοδύναμο αστέρα, βλέπε σχ. 4.2. Οι διορθωμένες σύνθετες αντιστάσεις θετικής (και αρνητικής) ακολουθίας $\underline{Z}_A$, $\underline{Z}_B$ και $\underline{Z}_C$ του ισοδύναμου αστέρα του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος υπολογίζονται με την ακόλουθη διαδικασία:



Σχήμα 4.2: Συνδεσμολογία Μ/Σ βοηθητικών μονάδος και ισοδύναμο κύκλωμα θετικής (και αρνητικής) ακολουθίας

Αρχικά υπολογίζουμε τις τρεις σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως, ανηγμένες στο τύλιγμα Υ.Τ. του Μ/Σ, ήτοι στα 21 kV, με τους παρακάτω τύπους:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{AB} &= \left(\frac{u_{RrAB}}{100} + j \frac{u_{XrAB}}{100} \right) \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}} & (\text{τύλιγμα } C \text{ ανοιχτό}) \\ \underline{Z}_{AC} &= \left(\frac{u_{RrAC}}{100} + j \frac{u_{XrAC}}{100} \right) \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}} & (\text{τύλιγμα } B \text{ ανοιχτό}) \\ \underline{Z}_{BC} &= \left(\frac{u_{RrBC}}{100} + j \frac{u_{XrBC}}{100} \right) \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}} & (\text{τύλιγμα } A \text{ ανοιχτό})\end{aligned}\quad (4-16)$$

με

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} \quad (4-17)$$

όπου

U_{rTA} είναι η ονομαστική τάση του τυλίγματος Α των 21 kV,
 $S_{rTAB}, S_{rTAC}, S_{rTBC}$ είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύ μεταξύ των τυλιγμάτων Α - Β, Α - C, Β - C αντιστοίχως και
 $u_{XrAB}, u_{RrAB}, u_{XrAC}, u_{RrAC}, u_{XrBC}, u_{RrBC}$ είναι οι ονομαστικές ωμικές και επαγωγικές συνιστώσες της τάσεως βραχυκυκλώσεως, μεταξύ των τυλιγμάτων Α - Β, Α - C, Β - C επί τοις εκατό, βλέπε Πίνακα 5.

Συνεπάγεται ότι:

$$\underline{Z}_{AB} = \left(\frac{0.398}{100} + j \frac{\sqrt{7.44^2 - 0.398^2}}{100} \right) \frac{(21 \text{ kV})^2}{15.8 \text{ MVA}} = (0.11109 + j2.07363) \Omega$$

$$\underline{Z}_{AC} = (0.07186 + j1.8849) \Omega$$

$$\underline{Z}_{BC} = (0.1892 + j4.8808) \Omega$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε τρεις διαφορετικούς συντελεστές διορθώσεως σύνθετης αντιστάσεως. Αυτοί προσδιορίζονται χρησιμοποιώντας τις σχετικές τιμές αντιδράσεων των τυλιγμάτων του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος:

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1+0.6x_{TAB}} = 0,95 \frac{1.1}{1+0,6(2.0736/\frac{(21 \text{ kV})^2}{15.8 \text{ MVA}})} \approx 1$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1+0.6x_{TAC}} = 0.993 \quad (4-18)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{c_{\max}}{1+0.6x_{TBC}} = 0.946$$

όπου

$c_{\max}$ είναι ο συντελεστής τάσεως, βλέπε Πίνακα 1, που αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση του δικτύου που συνδέεται στο τύλιγμα Χ.Τ. του Μ/Σ δικτύου και x_T είναι η σχετική αντίδραση του Μ/Σ.

Από τις τιμές των σύνθετων αντιστάσεων βραχυκυκλώσεως $\underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{AC}$ και $\underline{Z}_{BC}$ της ομάδας εξισώσεων 4-16, υπολογίζονται οι διορθωμένες τιμές $\underline{Z}_{ABK} = K_{TAB} \underline{Z}_{AB}$, $\underline{Z}_{ACK} = K_{TAC} \underline{Z}_{AC}$ και $\underline{Z}_{BCK} = K_{TBC} \underline{Z}_{BC}$. Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τιμές, υπολογίζουμε τις ισοδύναμες διορθωμένες σύνθετες αντιστάσεις θετικής και αρνητικής ακολουθίας Μ/Σ τριών τυλιγμάτων, $\underline{Z}_{AK}$, $\underline{Z}_{BK}$ και $\underline{Z}_{CK}$, με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

$$\underline{Z}_{AK} = \frac{1}{2} (K_{TAB} \underline{Z}_{AB} + K_{TAC} \underline{Z}_{AC} - K_{TBC} \underline{Z}_{BC}) \quad (4-19)$$

$$\underline{Z}_{BK} = \frac{1}{2} (K_{TBC} \underline{Z}_{BC} + K_{TAB} \underline{Z}_{AB} - K_{TAC} \underline{Z}_{AC}) \quad (4-20)$$

$$\underline{Z}_{CK} = \frac{1}{2} (K_{TAC} \underline{Z}_{AC} + K_{TBC} \underline{Z}_{BC} - K_{TAB} \underline{Z}_{AB}) \quad (4-21)$$

Συνεπάγεται ότι:

$$\underline{Z}_{AK} = (0.0017 + j0.3359) \Omega$$

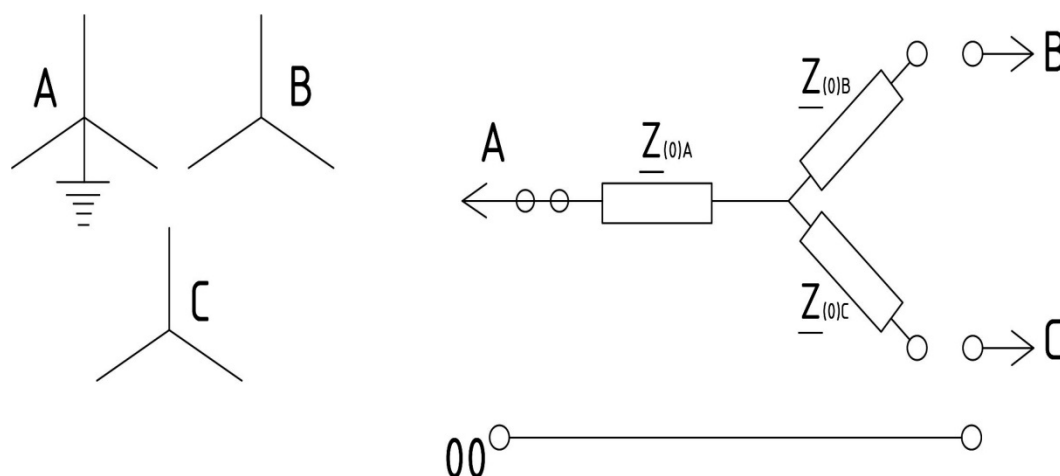
$$\underline{Z}_{BK} = (0.1094 + j2.4096) \Omega$$

$$\underline{Z}_{CK} = (0.0696 + j2.2077) \Omega$$

Αναφορικά προς την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος, η σύνθετη αντίδραση μηδενικής ακολουθίας που μετρήθηκε στο τύλιγμα Υ.Τ. ισούται με:

$$\underline{Z}_{(0)A} = j14.2 \Omega$$

Σύμφωνα με το [15]^{4.4} προκύπτει το ακόλουθο σχήμα όσον αφορά το κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας Μ/Σ τριών τυλιγμάτων με συνδεσμολογία τυλιγμάτων ΥΝγ0γ0^{4.5}:



Σχήμα 4.3: Ισοδύναμο κύκλωμα μηδενικής ακολουθίας Μ/Σ βοηθητικών μονάδος

4.2.7 Ασύγχρονοι κινητήρες Μ.Τ.

Για τον υπολογισμό της μέγιστης εντάσεως βραχυκυκλώσεως λαμβάνουμε υπόψη την συνεισφορά των κινητήρων Μ.Τ., όπως επίσης και των κινητήρων Χ.Τ. των βοηθητικών μονάδος, βλέπε παράγραφο 2.2 ανωτέρω. Οι σύνθετες αντιστάσεις των καλωδίων συνδέσεως που παρεμβάλλονται μεταξύ του ζυγού τροφοδοτήσεως και των κινητήρων, αμελούνται. Ως εκ τούτου τα αποτελέσματα βρίσκονται στην ασφαλή πλευρά. Το μέτρο της σύνθετης αντιστάσεως βραχυκυκλώσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας ασύγχρονου κινητήρα είναι ίσο με:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (4-22)$$

όπου

U_{rM} είναι η ονομαστική τάση του κινητήρα,

I_{rM} είναι η ονομαστική ένταση του κινητήρα,

S_{rM} είναι η ονομαστική φαινόμενη ισχύς του κινητήρα, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση $S_{rM} = P_{rM} / (n_{rM} * \cos \varphi_{rM})$, και

I_{LR}/I_{rM} είναι ο λόγος της εντάσεως ακινητοποιημένου δρομέα προς την ονομαστική ένταση του κινητήρα.

Στην περίπτωση τριφασικού ή διφασικού βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες των ασύγχρονων κινητήρων, τα ρεύματα βραχυκυκλώσεως I''_{kM} , i_{pM} , I_{bM} και I_{kM} υπολογίζονται κατά τον Πίνακα 8.

Πίνακας 8 - Υπολογισμός εντάσεων βραχυκυκλώσεως ασύγχρονων κινητήρων για σφάλμα στους ακροδέκτες αυτών^{4,6}

	Τριφασικό βραχυκύκλωμα	Διφασικό βραχυκύκλωμα	Βραχυκύκλωμα φάσεως με γη
Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως	$I''_{k3M} = \frac{c U_n}{\sqrt{3} Z_M}$	$I''_{k3M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$	—*
Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως	$i_{p3M} = \kappa_M \sqrt{2} I''_{k3M}$	$i_{p2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_{p3M}$	—*
	Για τους κινητήρες Μ.Τ. ισχύει: $\kappa_M = 1.65$ για κινητήρες με ισχύ ανά ζεύγος πόλων < 1 MW $\kappa_M = 1.75$ για κινητήρες με ισχύ ανά ζεύγος πόλων ≥ 1 MW Για τους ισοδύναμους κινητήρες Χ.Τ. ισχύει: $\kappa_M = 1.3$		
Συμμετρική ένταση διακοπής	$I_{b3M} = \mu q I''_{k3M}$	$I_{b2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$	—*
	Ο συντελεστής μ σύμφωνα με τον Πίνακα 9, για I''_{kM}/I''_{rM} . Ο συντελεστής q σύμφωνα με τον Πίνακα 9, για P_{rM}/p .		
Ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως	$I_{k3M} = 0$	$I_{k2M} = \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3M}$	—*

* Θεωρούμε, ελλείψει σχετικών στοιχείων, περιπτώσεις ασύγχρονων κινητήρων με αγείωτο ουδέτερο

Στον Πίνακα 9, γίνεται ο υπολογισμός της ισοδύναμης σύνθετης αντιστάσεως βραχυκυκλώσεως θετικής και αρνητικής ακολουθίας των κινητήρων Μ.Τ., ανηγμένης στο τύλιγμα Α των 6.3 kV του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος. Επίσης υπολογίζονται και οι επιμέρους εντάσεις βραχυκυκλώσεως I''_{k3M} του κάθε κινητήρα

ξεχωριστά, για την περίπτωση τριφασικού σφάλματος στο ζυγό των 6.3 kV, ήτοι στη θέση F4.

Εν συνεχεία υπολογίζονται οι επιμέρους τιμές κορυφής και διακοπής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως για τη διαστασιολόγηση της προστατευτικής διατάξεως του κάθε κινητήρα. Η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως μηδενικής ακολουθίας είναι άπειρη στην περίπτωση ασύγχρονου κινητήρα με αγείωτο ουδέτερο ή σύνδεση κατά τρίγωνο, πεπερασμένη δε σε περίπτωση γειωμένου κόμβου.

Πίνακας 9 - Δεδομένα ασύγχρονων κινητήρων Μ.Τ. και υπολογισμός των επιμέρους εντάσεων βραχυκυκλώσεως αυτών σε περίπτωση σφάλματος στο ζυγό Α^{4.7}

Ζυγός τροφοδοτήσεως βοηθητικών φορτίων		Α (Θέση F4)						
Αριθμός κινητήρα		M1	M2	M3	M4	M5	M6	Σ (1...6)
P_{rM}	MW	0,36	3	2,8	1,25	1,25	0,35	9,01
Ποσότητα	—	1	1	1	1	1	1	—
U_{rM}	kV	6						—
$\cos\varphi_{rM}$	—	0,89	0,91	0,92	0,78	0,78	0,87	—
n_{rM}	—	0,948	0,955	0,966	0,945	0,945	0,930	—
I_{LR}/I_{rM}	—	4,7	6	6	5,5	5,5	6	—
Ζεύγη πόλων p	—	2	1	1	6	6	1	—
$S_{rM}, \Sigma S_{rM}$	MVA	0,427	3,452	3,151	1,696	1,696	0,433	10,854
$I_{rM}, \Sigma I_{rM}$	kA	0,041	0,332	0,303	0,163	0,163	0,037	1,040
P_{rM}/p	MW	0,180	3,000	2,800	0,208	0,208	0,350	—
R_M/X_M	—	0,15	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15	—
κ_M	—	1,65	1,75	1,75	1,65	1,65	1,65	—
$\mu (t_{\min} = 0,1s)^{2)}$	—	0,747	0,698	0,698	0,714	0,714	0,698	—
$q(t_{\min} = 0,1s)^{3)}$	—	0,364	0,702	0,694	0,382	0,382	0,444	—

$I''_{kM}, \sum I''_{kM}$	kA	0,223	2,302	2,101	1,037	1,037	0,256	6,955
i_{pM}	kA	0,520	5,697	5,200	2,419	2,419	0,598	16,853
I_{bM}	kA	0,061	1,128	1,018	0,283	0,283	0,080	2,851
Z_M	Ω	17,950	1,738	1,904	3,860	3,860	13,870	0,573
X_M	Ω	17,752	1,729	1,895	3,817	3,817	13,718	0,568
R_M	Ω	2,663	0,173	0,189	0,573	0,573	2,058	0,065
²⁾ $\mu (0,1 s) = 0,62 + 0,72e^{-0,32(I''_{kM} / I_{rM})}$ (εξίσωση 70 του προτύπου IEC 60909-0) ³⁾ $q (0,1 s) = 0,57 + 0,12\ln(P_{rM}/p)$ (εξίσωση 73 του προτύπου IEC 60909-0)								

4.2.8 Μ/Σ & κινητήρες Χ.Τ.

Οι κινητήρες και οι Μ/Σ Χ.Τ., λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό της συνεισφοράς των βοηθητικών της μονάδος στην αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_k στη θέση F4 ή στο δίκτυο Χ.Τ. των 0.42 kV. Οι σύνθετες αντιστάσεις των Μ/Σ δίδονται από τις προαναφερθείσες εξισώσεις 4-9, 4-10 & 4-11 του παρόντος κεφαλαίου:

$$Z_{THV} = \frac{u_{kr}}{100} \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = \frac{6}{100} \frac{(6.3 \text{ kV})^2}{2 \text{ MVA}} = 1.191 \Omega$$

$$R_{THV} = P_{krT} \left(\frac{U_{rTHV}}{S_{rT}} \right)^2 = 21.2 \text{ kW} \left(\frac{6.3 \text{ kV}}{2 \text{ MVA}} \right)^2 = 0.210 \Omega$$

$$X_{THV} = 1.172 \Omega$$

Ο συντελεστής διορθώσεως K_T υπολογίζεται σύμφωνα με την εξ. 4-12:

$$K_T = 0.95 \frac{c_{\max}}{1+0.6x_T} = 1.009$$

Στον Πίνακα 10 υπολογίζεται η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως, θετικής και αρνητικής ακολουθίας, των κινητήρων σε σειρά με τους Μ/Σ τροφοδοτήσεως, καθώς και η αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως σε περίπτωση σφάλματος σε ζυγό της Χ.Τ. Τα ονομαστικά στοιχεία των κινητήρων συμπληρώθηκαν σύμφωνα με την παράγραφο 3.8.2 του [1], ενώ οι εντάσεις βραχυκυκλώσεως, I''_{k3M} , υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον Πίνακα 8 ανωτέρω.

Τα αποτελέσματα ανάγονται στο τύλιγμα Μ.Τ. των Μ/Σ, ήτοι στα 6.3 kV, και εν συνεχεία υπολογίζεται η συνεισφορά των κινητήρων Χ.Τ. για τριφασικό βραχυκύκλωμα στη θέση F4.

Πίνακας 10 - Δεδομένα Μ/Σ & ασύγχρονων κινητήρων Χ.Τ. καθώς και οι επιμέρους εντάσεις βραχυκυκλώσεως αυτών στη θέση F4 ζυγό και σε ζυγό Χ.Τ.^{4,8}

Ομάδα Μ/Σ Χ.Τ.		T1 ... T4	$\sum T1 \dots T4$	Παρατηρήσεις
S_{rT}	MVA	2	8	Ονομαστικά στοιχεία Μ/Σ, συνδεσμολογίας <i>Dyn1</i>
U_{rTHV}	kV	6,3		
U_{rTLV}	kV	0.42		
u_{kr}	%	6		
P_{krT}	kW	21.2		
Ομάδα κινητήρων Χ.Τ.		M7 ... M12	$\sum M7 \dots M12$	
P_{rM}	MW	0.177	1.063	Ονομαστικά στοιχεία κινητήρων (IEC 60909-0,3.8.2) (IEC 60909-0,3.8.2) (IEC 60909-0,3.8.2) $P_{rM}/(\cos\varphi_{rM} \ n_{rM})$
U_{rM}	kV	0,4		
I_{LR}/I_{rM}	—	5		
R_M/X_M	—	0.42		
K_M	—	1.3		
S_{rM}	MVA	0.206	1.236	
R_{THVK}	Ω	0.212		Βλέπε (παράγραφο 3.3.1, IEC 60909-0)
X_{THVK}	Ω	1.183		
R_M	Ω	0.060		RM=0,42 XM XM= 0,922 ZM ¹⁾
X_M	Ω	0.143		
I''_{k3M}	kA	1.642		c = 1,05, $U_n=0,42$ kV, $U_{rM}=0,40$ kV
$R_{Mt} = R_M t_r^2$	Ω	13.5		$t_r = 6.3$ kV / 0.42 kV
$X_{Mt} = X_M t_r^2$	Ω	32.175		
$R_{THVK} + R_{Mt}$	Ω	13.712		Στο τύλιγμα Μ.Τ. των 6,3 kV
$X_{THVK} + X_{Mt}$	Ω	32.318		
$ \underline{Z}_{THVK} + \underline{Z}_{Mt} $	Ω	35.107		
$I''_{kTF4}, \sum I''_{kTF4}$	kA	0,114	0.684	Στη θέση σφάλματος F4

4.3 Αναλυτικός υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου

4.3.1 Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως $\underline{I}''_k$

Η αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως $\underline{I}''_k$ στη θέση F1 θα υπολογισθεί ως το άθροισμα των εντάσεων $\underline{I}''_{kQ}$, $\underline{I}''_{kS}$ και $\underline{I}''_{kM,AT}$ ήτοι της συνεισφοράς από το άπειρο δίκτυο, την ηλεκτροπαραγωγό μονάδα και τους κινητήρες του ζυγού των 6.3 kV του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος.

Η ένταση $\underline{I}''_{kQ}$ της συνεισφοράς του δικτύου των 400 kV υπολογίζεται από την εξ. 4-1:

$$\underline{I}''_{kQmax} = \frac{c_{max} U_{nQ}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{Qmin}} = \frac{1.1 \times 400 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.63193 + j6.31933)} = 40 \angle -84.29^\circ \text{ kA}$$

και

$$\underline{I}''_{kQmin} = \frac{c_{min} U_{nQ}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{Qmax}} = \frac{1 \times 400 \text{ kV}}{\sqrt{3} (2.36901 + j23.6901)} = 9.7 \angle -84.29^\circ \text{ kA}$$

Η ένταση $\underline{I}''_{kS}$ της συνεισφοράς της μονάδος παραγωγής ευρίσκεται από τον τύπο:

$$\underline{I}''_{kS} = \frac{c U_{nQ}}{\sqrt{3} (\underline{Z}_s + \underline{Z}_L)} \quad (4-23)$$

με τις $\underline{Z}_s$, $\underline{Z}_{Lmin}$ & $\underline{Z}_{Lmax}$ να έχουν υπολογιστεί στις ανωτέρω παραγράφους 4.2.2 & 4.2.5 αντίστοιχως. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$\underline{I}''_{kSmax} = \frac{1.1 \times 400 \text{ kV}}{\sqrt{3} ((1.60512 + j134.18263) + (1.537 + j15.26))} = 1.699 \angle -88.79^\circ \text{ kA}$$

και

$$\underline{I}''_{kSmin} = \frac{1 \times 400 \text{ kV}}{\sqrt{3} ((1.60512 + j134.18263) + (1.90588 + j15.26))} = 1.545 \angle -88.65^\circ \text{ kA}$$

Η δε ένταση $\underline{I}''_{kM,AT}$ της συνεισφοράς των ασύγχρονων κινητήρων Μ.Τ. αμελείται καθώς η συνολική συνεισφορά τους είναι κατά πολύ μικρότερη της αρχικής συμμετρικής εντάσεως βραχυκυκλώσεως $\underline{I}''_k$, βλέπε Πίνακες 9 & 10. Συνεπάγεται ότι:

$$\underline{I}''_{kmax} = \underline{I}''_{kQmax} + \underline{I}''_{kSmax} = 41.694 \angle -84.47^\circ \text{ kA}$$

και

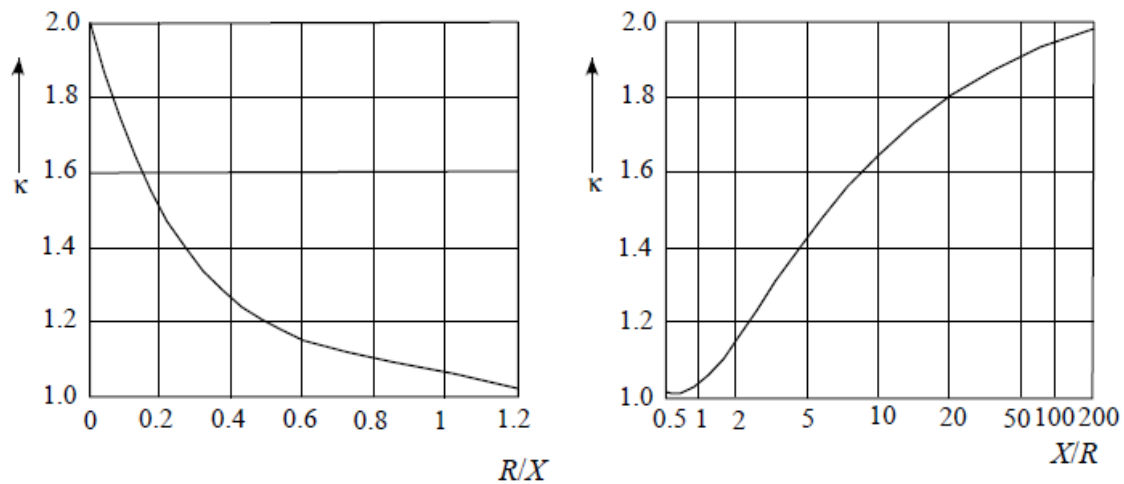
$$\underline{I}''_{kmin} = \underline{I}''_{kQmin} + \underline{I}''_{kSmin} = 11.241 \angle -84.89^\circ \text{ kA}$$

4.3.2 Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p

Η τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p υπολογίζεται ως το άθροισμα των εντάσεων i_{pQ} και i_{pS} . Η συνεισφορά του κάθε κλάδου υπολογίζεται από την εξ. 1-3:

$$i_p = \kappa \sqrt{2} I''_k$$

όπου ο συντελεστής κ , για τον υπολογισμό της τιμής κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως, υπολογίζεται μέσω της εξ. 1-4 ή από το σχ. 4.4.



Σχήμα 4.4: Ο συντελεστής κ συναρτήσει του λόγου R/X και X/R ^{4.9}

Όσον αφορά τη σύνθετη αντίσταση του δικτύου τροφοδοτήσεως γνωρίζουμε ότι $R_Q/X_Q \approx 0.1$, επομένως $\kappa = 1.746$.

Συνεπάγεται ότι:

$$i_{pQmax} = \kappa \sqrt{2} I''_{kQmax} = 98.769 \text{ kA}$$

και

$$i_{pQmin} = \kappa \sqrt{2} I''_{kQmin} = 23.951 \text{ kA}$$

Για τον υπολογισμό της τιμής κορυφής i_{pS} της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος κάνουμε χρήση της σύνθετης αντιστάσεως μονάδος παραγωγής με πλασματική ωμική αντίσταση, $\underline{Z}_{sf} = (4.24744 + j134.18263) \Omega$, σε σειρά με την σύνθετη αντίσταση των γραμμών μεταφοράς. Εξ αυτών προκύπτει ότι $(R_{sf} + R_{Lmin})/(X_{sf} +$

$X_{Lmin}) \approx 0.039$ και $\kappa = 1.893$, για θερμοκρασία γραμμών ίση με 20°C , ενώ $(R_{sf} + R_{Lmax})/(X_{sf} + X_{Lmax}) \approx 0.041$ και $\kappa = 1.886$, για θερμοκρασία γραμμών ίση με 80°C . Επομένως είναι:

$$i_{pSmax} = 1.893\sqrt{2} I''_{kSmax} = 4.548 \text{ kA}$$

και

$$i_{pSmin} = 1.886\sqrt{2} I''_{kSmin} = 4.121 \text{ kA}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p , για τριφασικό βραχυκύκλωμα στη θέση F1, ισούται με:

$$i_{pmax} = i_{pQmax} + i_{pSmax} = 103.317 \text{ kA}$$

και

$$i_{pmin} = i_{pQmin} + i_{pSmin} = 28.072 \text{ kA}$$

4.3.3 Συμμετρική ένταση διακοπής I_b

Για τον υπολογισμό της συμμετρικής εντάσεως διακοπής, I_b , απαιτείται η γνώση των συνιστωσών των προερχόμενων από το δίκτυο, I_{bQ} , και τη μονάδα παραγωγής, I_{bS} . Όσον αφορά τη τιμή συνιστώσας εντάσεως διακοπής I_{bQ} θεωρείται ίση με την αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_{kQ} ως μη τροφοδοτούμενη από στρεφόμενες μηχανές:

$$I_{bQmax} = I''_{kQmax} = 40 \text{ kA}$$

και

$$I_{bQmin} = I''_{kQmin} = 9.7 \text{ kA}$$

Για τον υπολογισμό της I_{bS} εργαζόμαστε σύμφωνα με την παράγραφο 4.5.2.1 του [1] και την εξ. 4-24:

$$I_b = \mu I''_k \quad (4-24)$$

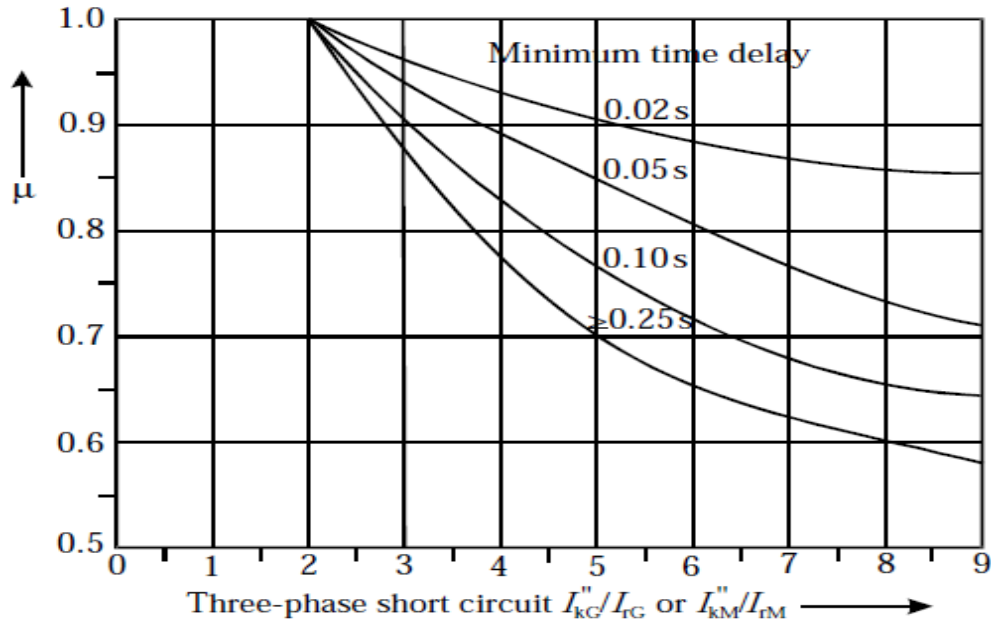
όπου ο συντελεστής μ εξαρτάται από το ελάχιστο χρονικό διάστημα μεταξύ της εμφάνισης του σφάλματος και της αποζεύξεως του πρώτου πόλου ενός διακόπτη ισχύος, καθώς και από το λόγο I''_{kG}/I_{rG} . Ως ένταση I''_{kG} , στην περίπτωση σφάλματος στη θέση F1, θεωρούμαι την αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως ηλεκτροπαραγωγού μονάδος I''_{kS} , ανηγμένης στο τύλιγμα Χ.Τ. του Μ/Σ μονάδος. Ο συντελεστής μ τότε θα ισούται με:

$$\mu_{max} = 0.62 + 0.72 e^{-0.32 I''_{kGmax}/I_{rG}} = 0.62 + 0.72 e^{-0.32 (32362/13746)} = 0.959$$

και

$$\mu_{\min} = 0.62 + 0.72 e^{-0.32 I''_{kG\min}/I_{rG}} = 0.62 + 0.72 e^{-0.32 (29429/13746)} = 0.983$$

για ελάχιστο χρονικό διάστημα $t_{\min} = 0.2$ s.



Σχήμα 4.5: Συντελεστής μ για τον υπολογισμό της συμμετρικής εντάσεως διακοπής

$$I_b^{4.10}$$

Ως εκ τούτου προκύπτει ότι:

$$I_{bS\max} = \mu_{\max} I''_{kS\max} = 0.959 \times 1.699 = 1.63 \text{ kA}$$

και

$$I_{bS\min} = \mu_{\min} I''_{kS\min} = 0.983 \times 1.545 = 1.519 \text{ kA}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$I_{b\max} = I_{bQ\max} + I_{bS\max} = 41.63 \text{ kA}$$

και

$$I_{b\min} = I_{bQ\min} + I_{bS\min} = 11.22 \text{ kA}$$

4.3.4 Ένταση βραχυκυκλώσεως μόνιμου καταστάσεως I_k

Η ένταση βραχυκυκλώσεως μόνιμου καταστάσεως στη θέση F1 υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων μετά το πέρας των υπομεταβατικών και μεταβατικών φαινομένων:

$$I_k = I_{kQ} + I_{kS}$$

Σύμφωνα με το [1] η συνεισφορά του δικτύου τροφοδοτήσεως στην ένταση μονίμου καταστάσεως θεωρείται ίση με την αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_{kQ} :

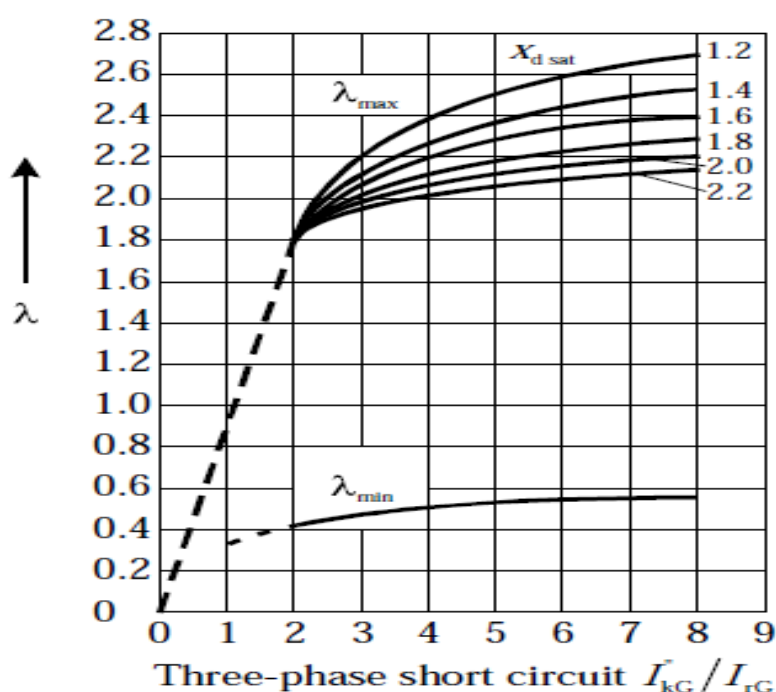
$$I_{kQ} = I''_{kQ} = 40 \text{ kA}$$

Όσον αφορά την συνεισφορά της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος στην ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως, θεωρείται ίση με:

$$I_{kS} = \lambda I_{rGt} \quad (4-25)$$

όπου I_{rGt} η ονομαστική ένταση γεννήτριας ανηγμένη στο τύλιγμα Υ.Τ. του Μ/Σ μονάδος και λ συντελεστής, ο οποίος εξαρτάται από παράγοντες όπως η κορεσμένη τιμή σύγχρονης αντιδράσεως της γεννήτριας, ο κορεσμός σιδήρου στον ρότορα, το σύστημα διεγέρσεως και η δράση του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως.

Για τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου με συνεισφορά από σύγχρονη γεννήτρια λείου δρομέα, αυτοδιεγειρόμενη μέσω στατού μετατροπέα και με μέγιστη δυνατή τάση διεγέρσεως ίση με 1.6 φορές την ονομαστική, η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του συντελεστή λ λαμβάνονται από το σχ. 4.5:



Σχήμα 4.6: Συντελεστές λ_{min} και λ_{max} για σύγχρονη γεννήτρια κυλινδρικού δρομέα με μέγιστη τάση διεγέρσεως 1.6 φορές την ονομαστική, υπό ονομαστικό φορτίο και συντελεστή ισχύος^{4.11}

Σύμφωνα με την κορεσμένη τιμή σύγχρονης αντιδράσεως του Πίνακα 3 και το λόγο I''_{kG}/I_{rG} , όπως αυτός υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, ο συντελεστής λ παίρνει τις εξής τιμές:

$$\lambda_{\max} \approx 2$$

$$\lambda_{\min} \approx 0.45$$

Συνεπάγεται ότι:

$$I_{kS\max} = \lambda_{\max} I_{rGt} = 2 \times 13.7464 \times (21/400) = 1.443 \text{ kA}$$

και

$$I_{kS\min} = \lambda_{\min} I_{rGt} = 0.45 \times 13.7464 \times (21/400) = 0.325 \text{ kA}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

$$I_{k\max} = I_{kQ\max} + I_{kS\max} = 41.443 \text{ kA}$$

και

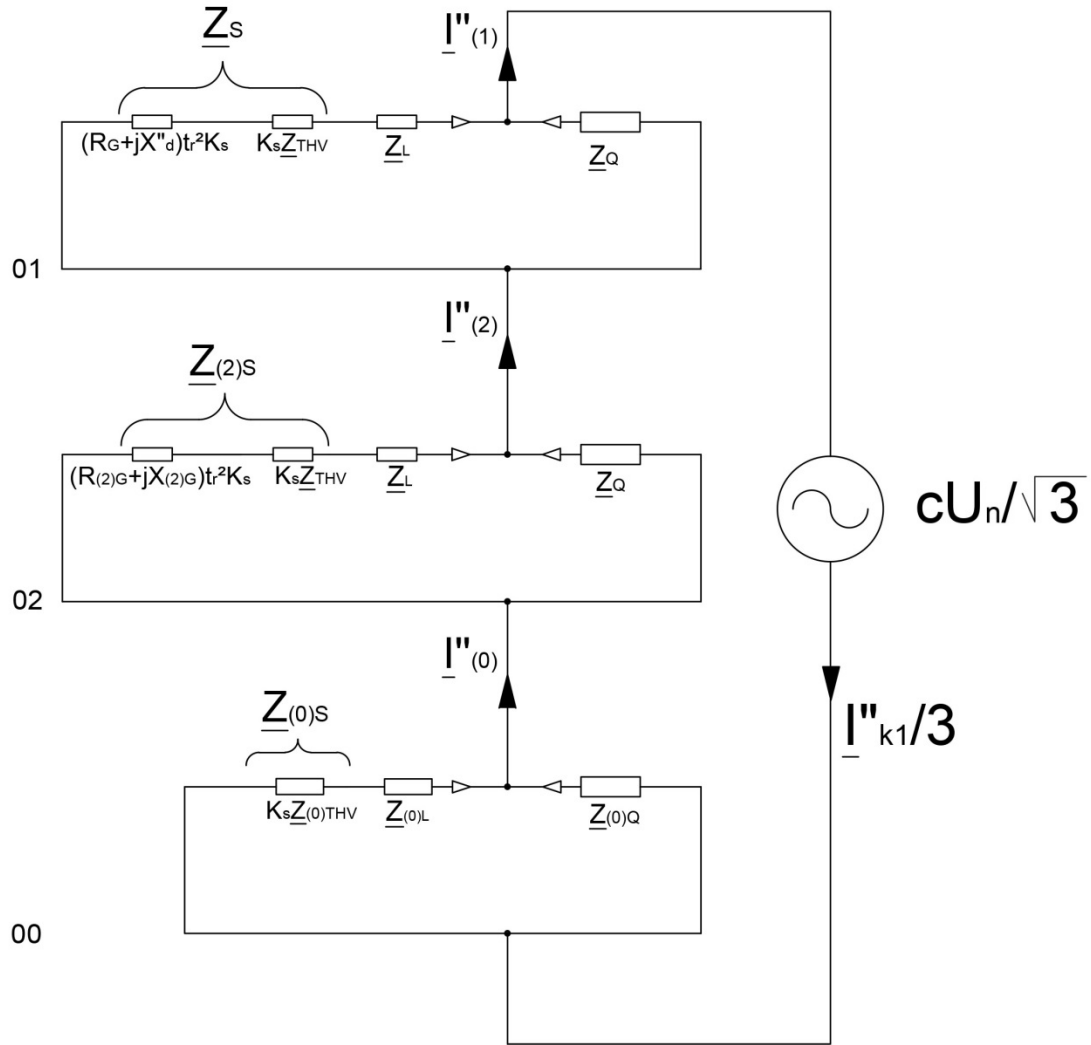
$$I_{k\min} = I_{kQ\min} + I_{kS\min} = 10.025 \text{ kA}$$

Αξίζει δε να σημειωθεί ότι $I''_k \approx I_b \approx I_k$, γεγονός που σύμφωνα με τους ορισμούς που δόθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο χαρακτηρίζει το τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου ως σφάλμα μακράν της γεννήτριας.

4.4 Αναλυτικός υπολογισμός μονοφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου

4.4.1 Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως $\underline{I''}_{k1}$

Το ισοδύναμο κύκλωμα στην περίπτωση αυτή συνίσταται από δύο παράλληλους κλάδους, αμελούμενης της συνεισφοράς των κινητήρων Μ.Τ. & Χ.Τ. Ο πρώτος κλάδος περιλαμβάνει το άπειρο δίκτυο των 400 kV ενώ ο δεύτερος κλάδος περιλαμβάνει την ηλεκτροπαραγωγό μονάδα σε σειρά με τις γραμμές μεταφοράς. Για το ισοδύναμο κύκλωμα του κάθε κλάδου ισχύει ότι αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη, ήτοι τα ακολουθιακά κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας συνδέονται σε σειρά και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα κλάδου, $\underline{I''}_{k1Q}$ και $\underline{I''}_{k1S}$ αντίστοιχα.



Σχήμα 4.7: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος στο ζυγό των 400 kV

Οι σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας του άπειρου δικτύου των 400 kV είναι ίσες με:

$$\underline{Z}_{Q\min} = \underline{Z}_{(2)Q\min} = \underline{Z}_{(0)Q\min} = (0.63193 + j6.31933)\Omega$$

και

$$\underline{Z}_{Q\max} = \underline{Z}_{(2)Q\max} = (2.36901 + j23.6901)\Omega,$$

$$\underline{Z}_{(0)Q\max} = (2.15579 + j21.55799)\Omega$$

αντίστοιχα.

Οι σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος σε σειρά με τις γραμμές μεταφοράς υπολογίζονται ως εξής:

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας ισούται με:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{(1)Kmin} &= \underline{Z}_S + \underline{Z}_{Lmin} = K_S (t_r^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_{THV}) + \underline{Z}_{Lmin} = \\ &= (1.60512 + j134.18263) + (1.537 + j15.26) = \\ &= (3.14212 + j149.44263) \Omega\end{aligned}$$

και

$$\underline{Z}_{(1)Kmax} = \underline{Z}_S + \underline{Z}_{Lmax} = (3.51099 + j149.44263) \Omega$$

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας ισούται με:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{(2)Kmin} &= \underline{Z}_{(2)S} + \underline{Z}_{Lmin} = K_S (t_r^2 \underline{Z}_{(2)G} + \underline{Z}_{THV}) + \underline{Z}_{Lmin} = \\ &= (9.22447 + j135.57478) + (1.537 + j15.26) = \\ &= (10.76147 + j150.83478) \Omega\end{aligned}$$

και

$$\underline{Z}_{(2)Kmax} = \underline{Z}_{(2)S} + \underline{Z}_{Lmax} = (11.13035 + j150.83478) \Omega$$

Αναλόγως, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας είναι ίση με

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{(0)Kmin} &= \underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Lmin} = \\ &= j63.02924 + (11.65 + j35.75) = \\ &= (11.65 + j98.77924) \Omega\end{aligned}$$

και

$$\underline{Z}_{(0)Kmax} = \underline{Z}_{(0)S} + \underline{Z}_{(0)Lmax} = (14,446 + j98,77924) \Omega$$

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας των δύο παράλληλων κλάδων υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_{(1)min} = \frac{\underline{Z}_{(1)Kmin} \underline{Z}_{Qmin}}{\underline{Z}_{(1)Kmin} + \underline{Z}_{Qmin}} = \frac{-942.39172 + j114.29337}{3.77405 + j155.76196} = (0.58683 + j6,06442) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{(1)max} = \frac{\underline{Z}_{(1)Kmax} \underline{Z}_{Qmax}}{\underline{Z}_{(1)Kmax} + \underline{Z}_{Qmax}} = \frac{-3531.9932 + j437.2067}{5.88 + j173.13272} = (1.83031 + j20.46266) \Omega$$

Αναλόγως, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας των δύο παράλληλων κλάδων υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_{(2)min} = \frac{\underline{Z}_{(2)Kmin} \underline{Z}_{Qmin}}{\underline{Z}_{(2)Kmin} + \underline{Z}_{Qmin}} = (0.59952 + j6.06541) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{(2)max} = \frac{\underline{Z}_{(2)Kmax} \underline{Z}_{Qmax}}{\underline{Z}_{(2)Kmax} + \underline{Z}_{Qmax}} = (1.97447 + j20.47603) \Omega$$

Τέλος, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας των δύο παράλληλων κλάδων υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_{(0)\min} = \frac{\underline{Z}_{(0)K\min} \underline{Z}_{Q\min}}{\underline{Z}_{(0)K\min} + \underline{Z}_{Q\min}} = (0.60033 + j5.93947) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{(0)\max} = \frac{\underline{Z}_{(0)K\max} \underline{Z}_{Q\max}}{\underline{Z}_{(0)K\max} + \underline{Z}_{Q\max}} = (1.91544 + j17.70141) \Omega$$

Με βάση τα ανωτέρω η αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως $\underline{I}''_{k1}$ υπολογίζεται, σύμφωνα με την εξ. 1-23 και την παράγραφο 4.2.4 του [1], ως εξής:

$$\underline{I}''_{k1\max} = \frac{\sqrt{3} c_{\max} U_{nQ}}{\underline{Z}_{(1)\min} + \underline{Z}_{(2)\min} + \underline{Z}_{(0)\min}} = 41.972 \angle -84.35^\circ \text{ kA}$$

και

$$\underline{I}''_{k1\min} = \frac{\sqrt{3} c_{\min} U_{nQ}}{\underline{Z}_{(1)\max} + \underline{Z}_{(2)\max} + \underline{Z}_{(0)\max}} = 11.76 \angle -84.43^\circ \text{ kA}$$

4.4.2 Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_{p1}

Η τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_{p1} υπολογίζεται ως το άθροισμα των εντάσεων i_{p1Q} και i_{p1S} .

Από την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του κλάδου του δικτύου τροφοδοτήσεως προκύπτει ότι $R_Q/X_Q \approx 0.1$ και $\kappa = 1.746$.

Συνεπάγεται ότι:

$$i_{p1Q\max} = \kappa \sqrt{2} I''_{kQ1\max} = 98.769 \text{ kA}$$

και

$$i_{p1Q\min} = \kappa \sqrt{2} I''_{kQ1\min} = 24.692 \text{ kA}$$

Για τον υπολογισμό της τιμής κορυφής i_{ps} της ηλεκτροπαραγωγού μονάδος κάνουμε χρήση της σύνθετης αντιστάσεως μονάδος παραγωγής με πλασματική ωμική αντίσταση, $\underline{Z}_{sf} = (4.24744 + j134.18263) \Omega$, σε σειρά με την σύνθετη αντίσταση των γραμμών μεταφοράς. Εξ αυτών προκύπτει ότι $(R_{sf} + R_{L\min})/(X_{sf} + X_{L\min}) \approx 0.039$ και $\kappa = 1.893$, για θερμοκρασία γραμμών ίση με 20°C , ενώ $(R_{sf} + R_{L\max})/(X_{sf} + X_{L\max}) \approx 0.041$ και $\kappa = 1.886$ για θερμοκρασία γραμμών ίση με 80°C . Συνεπάγεται ότι:

$$i_{p1S\max} = 1.893 \sqrt{2} I''_{k1S\max} = 5.279 \text{ kA}$$

και

$$i_{p1S\min} = 1.886 \sqrt{2} I''_{k1S\min} = 4.71 \text{ kA}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_{p1} για μονοφασικό βραχυκύκλωμα στη θέση F1 ισούται με:

$$i_{p1max} = i_{p1Qmax} + i_{p1Smax} = 104 \text{ kA}$$

και

$$i_{p1min} = i_{p1Qmin} + i_{p1Smin} = 29.402 \text{ kA}$$

4.4.3 Συμμετρική ένταση διακοπής I_{b1} και ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως I_{k1}

Όσον αφορά ασύμμετρο σφάλμα, σύμφωνα με τις παραγράφους 4.6.4 & 4.5.2.4 του [1], η απόσβεση της ροής του ρότορα δεν λαμβάνεται υπόψη και ως εκ τούτου ισχύει:

$$I_{k1max} \approx I_{b1max} \approx I''_{k1max} = 41.972 \text{ kA}$$

και

$$I_{k1min} \approx I_{b1min} \approx I''_{k1min} = 11.76 \text{ kA}$$

4.5 Αναλυτικός υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας

4.5.1 Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_k

Η αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_k στους ακροδέκτες της γεννήτριας θα υπολογισθεί ως το άθροισμα των εντάσεων I''_{kT} , I''_{kG} και $I''_{kM,AT}$ ήτοι της συνεισφοράς από το Μ/Σ μονάδος, την σύγχρονη γεννήτρια και τους κινητήρες του ζυγού των 6.3 kV του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος. Η μέγιστη τιμή εκ των συνιστωσών της εντάσεως βραχυκυκλώσεως θα χρησιμοποιηθεί για την διαστασιολόγηση των αγωγών που συνδέουν τη γεννήτρια με το Μ/Σ ανυψώσεως, καθώς και του διακόπτη ισχύος που παρεμβάλλεται μεταξύ αυτών.

Η ένταση I''_{kT} της συνεισφοράς του Μ/Σ μονάδος υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I''_{kTmax} = \frac{c_{max} U_{nQ}}{\sqrt{3} Z_{kmin}}$$

και

$$I''_{kTmin} = \frac{c_{min} U_{nQ}}{\sqrt{3} Z_{kmax}}$$

όπου $\underline{Z}_k$ το άθροισμα των σύνθετων αντιστάσεων θετικής ακολουθίας του άπειρου δικτύου, των γραμμών μεταφοράς και του Μ/Σ μονάδος, ανηγμένων στο τύλιγμα Χ.Τ. του Μ/Σ, ήτοι:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{Kmin} &= \frac{1}{t_r^2} \underline{Z}_{Qmin} + \frac{1}{t_r^2} \underline{Z}_{Lmin} + \underline{Z}_{TLV} = \\ &= 0.00276\{(0.63193 + j6.31933) + (1.537 + j15.26)\} + (0.00178 + 0.16031) = \\ &= (0.00776 + j0.21979) \Omega\end{aligned}$$

και

$$\underline{Z}_{Kmax} = \frac{1}{t_r^2} \underline{Z}_{Qmax} + \frac{1}{t_r^2} \underline{Z}_{Lmax} + \underline{Z}_{TLV} = (0.01356 + j0.26767) \Omega$$

Συνεπάγεται ότι:

$$\underline{I}_{kTmax}'' = \frac{c_{max} U_{nQ}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{kmin}} = \frac{1.1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.00776 + j0.21979) \Omega} = 60.642 \angle -87.98^\circ \text{ kA}$$

και

$$\underline{I}_{kTmin}'' = \frac{c_{min} U_{nQ}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{kmax}} = \frac{1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.01356 + j0.26767) \Omega} = 45.238 \angle -87.10^\circ \text{ kA}$$

Η ένταση $\underline{I}_{kG}''$ της συνεισφοράς της γεννήτριας υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\underline{I}_{kG}'' = \frac{c_{max} U_{nQ}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{Gk}}$$

όπου $\underline{Z}_{Gk}$ η διορθωμένη σύνθετη αντίσταση γεννήτριας, η οποία υπολογίστηκε στη παράγραφο 4.2.3:

$$\underline{Z}_{Gk} = (0.00228 + j0.17867) \Omega$$

Συνεπάγεται ότι:

$$\underline{I}_{kGmax}'' = \frac{c_{max} U_{nQ}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{Gk}} = \frac{1.1 \times 21 \text{ kV}}{\sqrt{3} (0.00228 + j0.17867) \Omega} = 74.638 \angle -89.27^\circ \text{ kA}$$

και

$$\underline{I}_{kGmin}'' = \frac{c_{min} U_{nQ}}{\sqrt{3} \underline{Z}_{Gk}} = 67.85 \angle -89.27^\circ \text{ kA}$$

Η δε ένταση $\underline{I}_{kM,AT}''$ της συνεισφοράς των ασύγχρονων κινητήρων Μ.Τ. αμελείται καθώς η συνολική συνεισφορά τους είναι κατά πολύ μικρότερη της αρχικής συμμετρικής εντάσεως βραχυκυκλώσεως $\underline{I}_k''$, βλέπε Πίνακες 9 & 10.

Ως εκ τούτου προκύπτει:

$$\underline{I}''_{kmax} = \underline{I}''_{kTmax} + \underline{I}''_{kGmax} = 135.28\angle - 88.69^\circ \text{ kA}$$

και

$$\underline{I}''_{kmin} = \underline{I}''_{kTmin} + \underline{I}''_{kGmin} = 113.09\angle - 88.40^\circ \text{ kA}$$

4.5.2 Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p

Η τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p υπολογίζεται ως το άθροισμα των εντάσεων i_{pT} και i_{pG} . Η συνεισφορά του κάθε κλάδου υπολογίζεται από τη σχ. 1-3, $i_p = \kappa\sqrt{2} I''_k$, όπου ο συντελεστής κ υπολογίζεται μέσω της προαναφερθείσας εξίσωσης ή από το σχ. 4.4.

Από το άθροισμα των σύνθετων αντιστάσεων του άπειρου δικτύου, των γραμμών μεταφοράς και του Μ/Σ μονάδος, ανηγμένων στο τύλιγμα Χ.Τ. του Μ/Σ, προκύπτει ότι για $\underline{Z}_{Kmin} = (0,00776 + j0,21979) \Omega$, ισχύει $R_K/X_K \approx 0.0353$ και $\kappa_{max} = 1.902$, ενώ για $\underline{Z}_{Kmax} = (0.01356 + j0,26767) \Omega$, ισχύει $R_K/X_K \approx 0.051$ και $\kappa_{min} = 1.861$.

Συνεπάγεται ότι:

$$i_{pTmax} = 163.1 \text{ kA}$$

και

$$i_{pTmin} = 119.11 \text{ kA}$$

Για τον υπολογισμό της τιμής κορυφής i_{pG} της συνεισφοράς της σύγχρονης γεννήτριας κάνουμε χρήση της διορθωμένης σύνθετης αντιστάσεως γεννήτριας με πλασματική ωμική αντίσταση, $\underline{Z}_{GfK} = (0.00893 + j0.17867) \Omega$. Ως εκ τούτου προκύπτει ότι $R_{GfK}/X_{GfK} \approx 0.05$ και $\kappa = 1.8635$.

Συνεπάγεται ότι:

$$i_{pGmax} = 196.7 \text{ kA}$$

και

$$i_{pGmin} = 178.8 \text{ kA}$$

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_p για τριφασικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της γεννήτριας είναι ίση με:

$$i_{pmax} = i_{pTmax} + i_{pGmax} = 359.8 \text{ kA}$$

και

$$i_{pmin} = i_{pTmin} + i_{pGmin} = 297.9 \text{ kA}$$

4.5.3 Συμμετρική ένταση διακοπής I_b

Για τον υπολογισμό της συμμετρικής εντάσεως διακοπής, I_b , απαιτείται η γνώση των συνιστωσών των προερχόμενων από το Μ/Σ μονάδος, I_{bT} , και τη σύγχρονη γεννήτρια, I_{bG} .

Όσον αφορά τη τιμή διακοπής I_{bT} , θεωρείται ίση με την αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_{kT} ως μη τροφοδοτούμενη από στρεφόμενες μηχανές.

$$I_{bTmax} = I''_{kTmax} = 60.642 \text{ kA}$$

και

$$I_{bTmin} = I''_{kTmin} = 45.238 \text{ kA}$$

Για τον υπολογισμό της I_{bG} εργαζόμαστε σύμφωνα με την εξ. 4-23:

$$I_{bG} = \mu I''_{kG}$$

όπου

$$\mu_{max} = 0.62 + 0.72 e^{-0.32 I''_{kGmax}/I_{rG}} = 0.62 + 0.72 e^{-0.32 (74.64/13.746)} = 0.7467$$

και

$$\mu_{min} = 0.62 + 0.72 e^{-0.32 I''_{kGmin}/I_{rG}} = 0.62 + 0.72 e^{-0.32 (67.85/13.746)} \approx 0.768$$

Ως εκ τούτου προκύπτει ότι:

$$I_{bGmax} = 55.73 \text{ kA}$$

και

$$I_{bGmin} = 52.13 \text{ kA}$$

Συνεπάγεται ότι:

$$I_{bG \max} = I_{bGmax} + I_{bTmax} = 116.37 \text{ kA}$$

και

$$I_{bG \min} = I_{bGmin} + I_{bTmin} = 97.368 \text{ kA}$$

4.5.4 Ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως I_k

Η ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως στους ακροδέκτες της γεννήτριας υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους εντάσεων, ήτοι:

$$I_k = I_{kT} + I_{kG}$$

Σύμφωνα με το [1] η συνεισφορά του Μ/Σ μονάδος στην ένταση μονίμου καταστάσεως θεωρείται ίση με την αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως I''_{kT} :

$$I_{kTmax} = I''_{kTmax} = 60.642 \text{ kA}$$

και

$$I_{kTmin} = I''_{kTmin} = 45.238 \text{ kA}$$

Όσον αφορά την συνεισφορά της σύγχρονης γεννήτριας στην ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως, για τριφασικό βραχυκύκλωμα στη θέση F2, η τάση διεγέρσεως μηδενίζεται καθώς μηδενίζεται η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας. Σύμφωνα με την παράγραφο 4.6.1.1 του [1], σε αυτή την περίπτωση ισχύει:

$$\lambda_{max} = \lambda_{min} = 0$$

Συνεπάγεται ότι:

$$I_{kGmax} = I_{kGmin} = 0 \text{ kA}$$

και ως εκ τούτου προκύπτει ότι:

$$I_{kmax} = I_{kTmax} = 60.642 \text{ kA}$$

και

$$I_{kmin} = I_{kTmin} = 45.238 \text{ kA}$$

Αξίζει δε να σημειωθεί ότι $I''_k > I_b > I_k$, γεγονός που σύμφωνα με τους ορισμούς που δόθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο χαρακτηρίζει το τριφασικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της γεννήτριας ως σφάλμα πλησίον της γεννήτριας.

4.6 Αναλυτικός υπολογισμός μονοφασικού βραχυκυκλώματος σε ακροδέκτη της γεννήτριας

4.6.1 Αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως $\underline{I''_{k1}}$

Το ισοδύναμο κύκλωμα στην περίπτωση μονοφασικού βραχυκυκλώματος σε ακροδέκτη της γεννήτριας συνίσταται από δύο παράλληλους κλάδους, αμελούμενης της συνεισφοράς των κινητήρων Μ.Τ. & Χ.Τ. Ο πρώτος κλάδος περιλαμβάνει τη σύγχρονη γεννήτρια ενώ ο δεύτερος κλάδος περιλαμβάνει το άπειρο δίκτυο των 400 kV σε σειρά με τις γραμμές μεταφοράς και το Μ/Σ μονάδος. Για το ισοδύναμο κύκλωμα του κάθε κλάδου ισχύει ότι αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος με γη, ήτοι τα ακολουθιακά κυκλώματα θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας συνδέονται σε σειρά και διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα κλάδου, $\underline{I''_{kG1}}$ και $\underline{I''_{kT1}}$ αντίστοιχα.

Οι διορθωμένες σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως θετικής, αρνητικής και μηδενικής ακολουθίας τη σύγχρονη γεννήτριας έχουν υπολογιστεί ως εξής:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \underline{Z}_G = (0.00228 + j0.17867) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(2)GK} = K_G \underline{Z}_{(2)G} = (0.02146 + j0.18218) \Omega$$

$$\underline{Z}_{(0)GK} = K_G \underline{Z}_{(0)G} = (3150.00088 + j0.07619) \Omega$$

$$\underline{Z}_{GfK} = K_G \underline{Z}_{Gf} = (0.00893 + j0.17867) \Omega$$

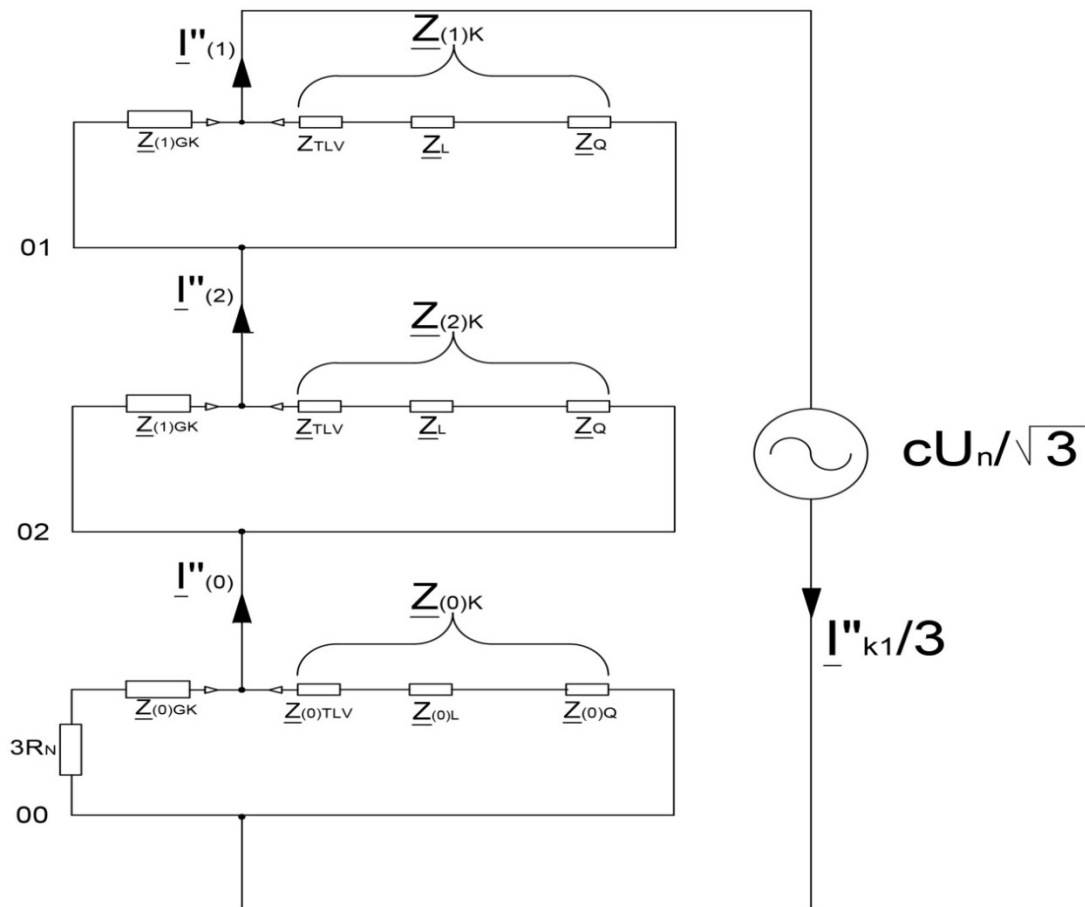
Οι σύνθετες αντιστάσεις βραχυκυκλώσεως του δικτύου των 400 kV σε σειρά με τις γραμμές μεταφοράς και το Μ/Σ μονάδος υπολογίζονται ως εξής:

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς της παραγράφου 4.5.1, η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας ισούται με:

$$\underline{Z}_{Kmin} = (0,00776 + j0,21979) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{Kmax} = (0.01356 + j0,26767) \Omega$$



Σχήμα 4.8: Σύνδεση ακολουθιακών κυκλωμάτων για την περίπτωση μονοφασικού σφάλματος σε ακροδέκτη της γεννήτριας

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση αρνητικής ακολουθίας ισούται με αυτή της θετικής:

$$\underline{Z}_{(2)Kmin} = \underline{Z}_{Kmin} = (0,00776 + j0,21979) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{(2)Kmax} = \underline{Z}_{Kmax} = (0,01356 + j0,26767) \Omega$$

Όσον αφορά την ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση μηδενικής ακολουθίας, σύμφωνα με το σχ. 4.1, τη συνδεσμολογία των τυλιγμάτων του Μ/Σ μονάδος και την ανωτέρω παράγραφο 1.3.1, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει αγωγίμος δρόμος μεταξύ της $\underline{Z}_{(0)K}$ και της θέσεως F2. Τουτέστιν η τελευταία δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς, ισχύει δε:

$$\underline{Z}_{(0)K} = \infty$$

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του ορθού ακολουθιακού κυκλώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_{(1)min} = \frac{\underline{Z}_{GK} \underline{Z}_{(1)Kmin}}{\underline{Z}_{GK} + \underline{Z}_{(1)Kmin}} = (0,00225 + j0,09857) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{(1)max} = \frac{\underline{Z}_{GK} \underline{Z}_{(1)Kmax}}{\underline{Z}_{GK} + \underline{Z}_{(1)Kmax}} = (0,00299 + j0,10718) \Omega$$

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του αντίστροφου ακολουθιακού κυκλώματος υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{Z}_{(2)min} = \frac{\underline{Z}_{(2)GK} \underline{Z}_{(2)Kmin}}{\underline{Z}_{(2)GK} + \underline{Z}_{(2)Kmin}} = (0,00799 + j0,09978) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{(2)max} = \frac{\underline{Z}_{(2)GK} \underline{Z}_{(2)Kmax}}{\underline{Z}_{(2)GK} + \underline{Z}_{(2)Kmax}} = (0,00981 + j0,10852) \Omega$$

Η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του ομοπολικού ακολουθιακού κυκλώματος ισούται με:

$$\underline{Z}_{(0)} = \underline{Z}_{(0)GK} = (3150,000884 + j0,07622) \Omega$$

Σύμφωνα με την εξ. 1-23 και την παράγραφο 4.2.4 του [1], η ένταση $\underline{I}''_{k1}$ που διαρρέει τους δύο παράλληλους κλάδους υπολογίζεται ως εξής:

$$\underline{I}''_{k1max} = \frac{\sqrt{3} c_{max} U_{nQ}}{\underline{Z}_{(1)min} + \underline{Z}_{(2)min} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \times 1,1 \times 21kV}{(3150,0115 + j0,2746) \Omega} = 0,013 \angle -0,005^\circ \text{ kA}$$

και

$$\underline{I}''_{k1min} = \frac{\sqrt{3} c_{min} U_{nQ}}{\underline{Z}_{(1)max} + \underline{Z}_{(2)max} + \underline{Z}_{(0)}} = \frac{\sqrt{3} \times 1 \times 21kV}{(3150.0142 + j0.28338) \Omega} = 0,012 \angle - 0.005^\circ \text{ kA}$$

4.6.2 Τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_{p1}

Η σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας του δικτύου τροφοδοτήσεως σε σειρά με τις γραμμές μεταφοράς και το Μ/Σ μονάδος έχει υπολογιστεί και ισούται με:

$$\underline{Z}_{Kmin} = (0.00776 + j0.21979) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{Kmax} = (0.01356 + j0.26767) \Omega$$

Για τον υπολογισμό της τιμής κορυφής i_p , απαιτείται να κάνουμε χρήση της διορθωμένης σύνθετης αντιστάσεως γεννήτριας με πλασματική ωμική αντίσταση, $\underline{Z}_{GfK} = (0.00893 + j0.17867) \Omega$.

Ως εκ τούτου προκύπτει ότι η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση θετικής ακολουθίας με πλασματική ωμική αντίσταση είναι ίση με:

$$\underline{Z}_{(1)min} = \frac{\underline{Z}_{GfK} \underline{Z}_{(1)Kmin}}{\underline{Z}_{GfK} + \underline{Z}_{(1)Kmin}} = (0.00428 + j0.09856) \Omega$$

και

$$\underline{Z}_{(1)max} = \frac{\underline{Z}_{GfK} \underline{Z}_{(1)Kmax}}{\underline{Z}_{GfK} + \underline{Z}_{(1)Kmax}} = (0.00538 + j0.10715) \Omega$$

Συνεπάγεται ότι για την $\underline{Z}_{(1)min}$ ισχύει $R_{min}/X_{min} \approx 0.0434$ και $\kappa = 1.88$, ενώ για την $\underline{Z}_{(1)max}$ ισχύει $R_{max}/X_{max} \approx 0.05$ και $\kappa = 1.863$. Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει ότι τιμή κορυφής της εντάσεως βραχυκυκλώσεως i_{p1} για μονοφασικό βραχυκύκλωμα στη θέση F2 είναι ίση με:

$$i_{p1max} = 1.88\sqrt{2} \times 0,0127 = 0.035 \text{ kA}$$

και

$$i_{p1max} = 1.863\sqrt{2} \times 0,0115 = 0.031 \text{ kA}$$

4.6.3 Συμμετρική ένταση διακοπής I_{b1} και ένταση βραχυκύκλωσης μονίμου καταστάσεως I_{k1}

Όσον αφορά ασύμμετρο σφάλμα, σύμφωνα με τις παραγράφους 4.6.4 & 4.5.2.4 του [1], η απόσβεση της ροής του ρότορα δεν λαμβάνεται υπόψη και ως εκ τούτου ισχύει:

$$I_{k1\max} \approx I_{b1\max} \approx I''_{k1\max} = 0.013 \text{ kA}$$

και

$$I_{k1\min} \approx I_{b1\min} \approx I''_{k1\min} = 0.012 \text{ kA}$$

4.7 Υπολογισμός βραχυκυκλωμάτων κατά IEC 60909 με χρήση του λογισμικού NEPLAN

4.7.1 Το λογισμικό NEPLAN

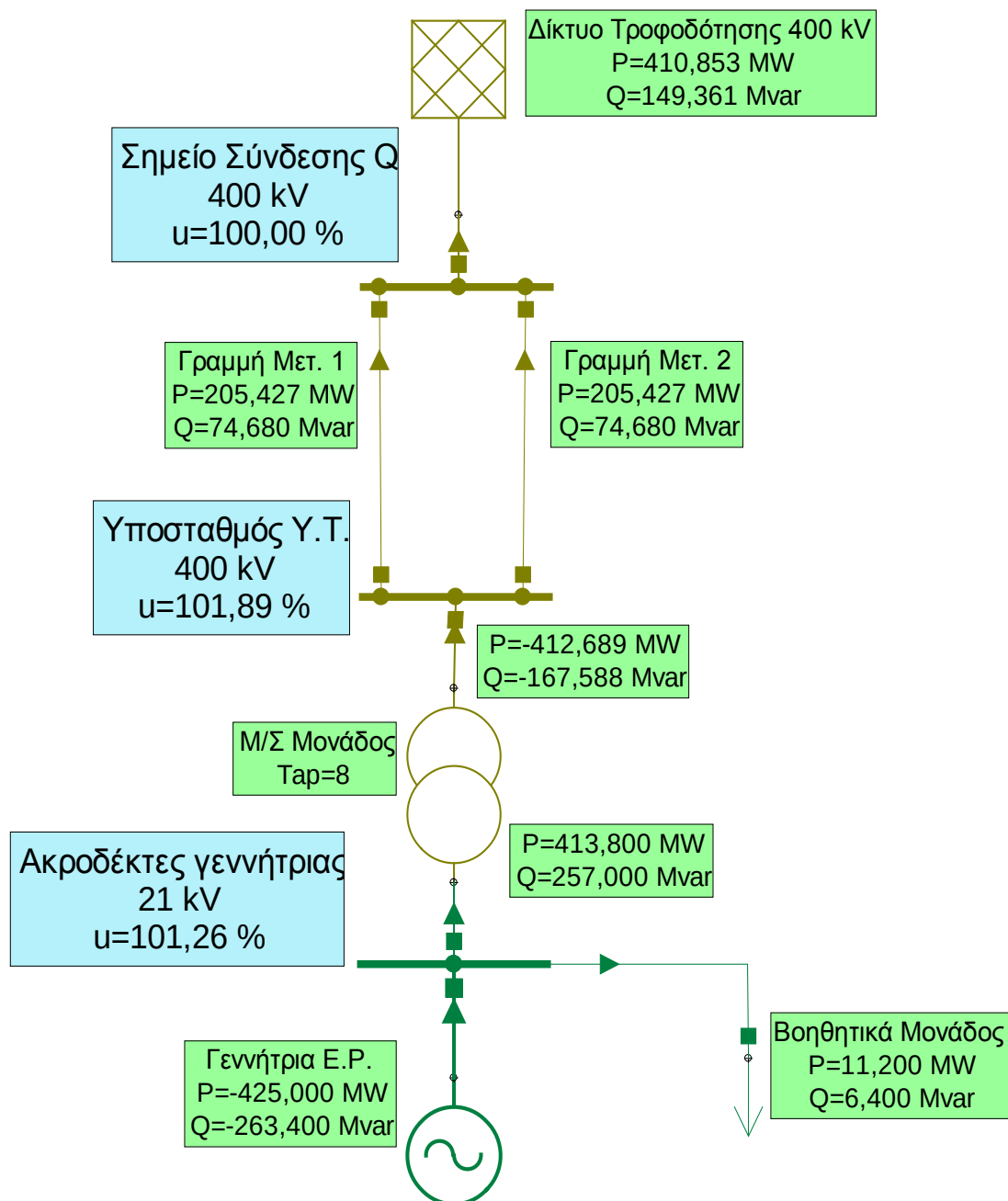
Το πρόγραμμα NEPLAN αποτελεί ένα εργαλείο ανάλυσης, σχεδίασης, βελτιστοποίησης και προσομοίωσης Σ.Η.Ε. καθώς και συστημάτων διαχείρισης νερού, αερίου και τηλεθέρμανσης. Χαρακτηρίζεται από υψηλής ποιότητας αλληλεπίδραση μεταξύ χρήστη και προγράμματος. Μεταξύ των δυνατοτήτων του περιλαμβάνεται η διεξαγωγή μελέτης φορτίου, η μελέτη διαφόρων σχημάτων προστασιών, η προσομοίωση μεταβατικών φαινομένων και πολλά ακόμη.

Στην παρούσα εργασία το πρόγραμμα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ηλεκτρικού συστήματος σταθμού παραγωγής συνδεδεμένου στο σύστημα μεταφοράς των 400 kV. Χρησιμοποιείται συγκεκριμένα η δυνατότητα του προγράμματος να εκτελέσει την μελέτη ροής φορτίου (Load Flow), ιδιαίτερα δε η διεξαγωγή υπολογισμών διαφόρων τύπων βραχυκυκλωμάτων (Short Circuit Analysis) σε διάφορες θέσεις, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60909.

4.7.2 Υπολογισμοί βραχυκυκλωμάτων

Μέσω του λογισμικού NEPLAN σχεδιάσαμε το Σ.Η.Ε., καταχωρήσαμε τις παραμέτρους του κεφάλαιου 3 στις επιμέρους συνιστώσες αυτού και στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε μελέτη ροής φορτίου, η οποία αντιπροσωπεύει την προσφαλματική μόνιμη κατάσταση του συστήματος. Όσον αφορά το συγκεκριμένο σενάριο φορτίσεως του Σ.Η.Ε., θεωρήσαμε το ζυγό των 400 kV ως ζυγό

ταλαντώσεως, το ζυγό της γεννήτριας ως ζυγό παραγωγής και τα βοηθητικά μονάδος ως ζυγό φορτίου. Η εγχεόμενη ισχύς στο δίκτυο θεωρείται ίση με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας για ονομαστικό συντελεστή ισχύος, ήτοι 425 MW και 263.4 Mvar. Στο σχ. 4.7 αναπαριστάται το μονογραμμικό διάγραμμα του Σ.Η.Ε. στο NEPLAN ενώ στα πλαίσια πράσινου και γαλάζιου χρώματος σημειώνονται η ροή ισχύος και οι τάσεις των ζυγών αντίστοιχα. Η μέθοδος υπολογισμού ροής φορτίου που επιλέχθηκε είναι η Extended Newton-Raphson.



Σχήμα 4.9: Μονογραμμικό διάγραμμα και αποτελέσματα ροής φορτίου του Σ.Η.Ε.

Εν συνεχεία επιλέξαμε την εκτέλεση υπολογισμού βραχυκυκλώματος, θέσαμε ως μέθοδο υπολογισμού το πρότυπο IEC 60909 (2001) και προχωρήσαμε σε σειρά υπολογισμών. Ως ελάχιστο χρονικό διάστημα μεταξύ της εμφάνισης του σφάλματος και της αποζεύξεως του πρώτου πόλου ενός διακόπτη ισχύος επιλέχθηκαν τα 200 ms.

Short Circuit Parameters

Parameter | Faulted nodes | Faulted lines | Special fault | Arc Flash Calculation

Fault type: 3phase fault

Calculation method: IEC60909 2001

Ik" max calculation ☒ Load flow before Short circuit calculation ☒

Fault distance (number of nodes) for display of results: 3 Asymmetrical network ☐

Calculation according to IEC60909

☐ Automatic selection of c factor 1,1

☐ Reduced tolerance in low-voltage system (only +6%)

☒ R/X at fault location for ip branch calculation

Fault duration in s for thermal current calculation: 1

Fault duration in s for DC current IDC calculation: 0,02

Time delay of CB in s for breaking current calc. Ib: 0,02

Calculation according to IEC61363-1 or IEC 61660-1(DC)

Currents at time .. s: 0

☐ Time Behaviour T end .. s: 0

Preload conditions: Nominal values

☐ Neglect SC current decay

Calculation according to ANSI

Number of Cycles for DC current IDC calculation: 2

Number cycles for breaking current calculation Ib: 2

E operating .. pu: 1

Arc Impedance (not according to IEC/ANSI)

Resistive part .. Ohm: 0

Reactive part .. Ohm: 0

Resonance earthed and isolated networks

☐ Simplified zero sequence impedance calculation

Un of resonance earthed or isolated network..kV: 0

Result File

☐ Write after calculation ☐ Format 4.x

Maximal loading of elements

Loading .. %: 100

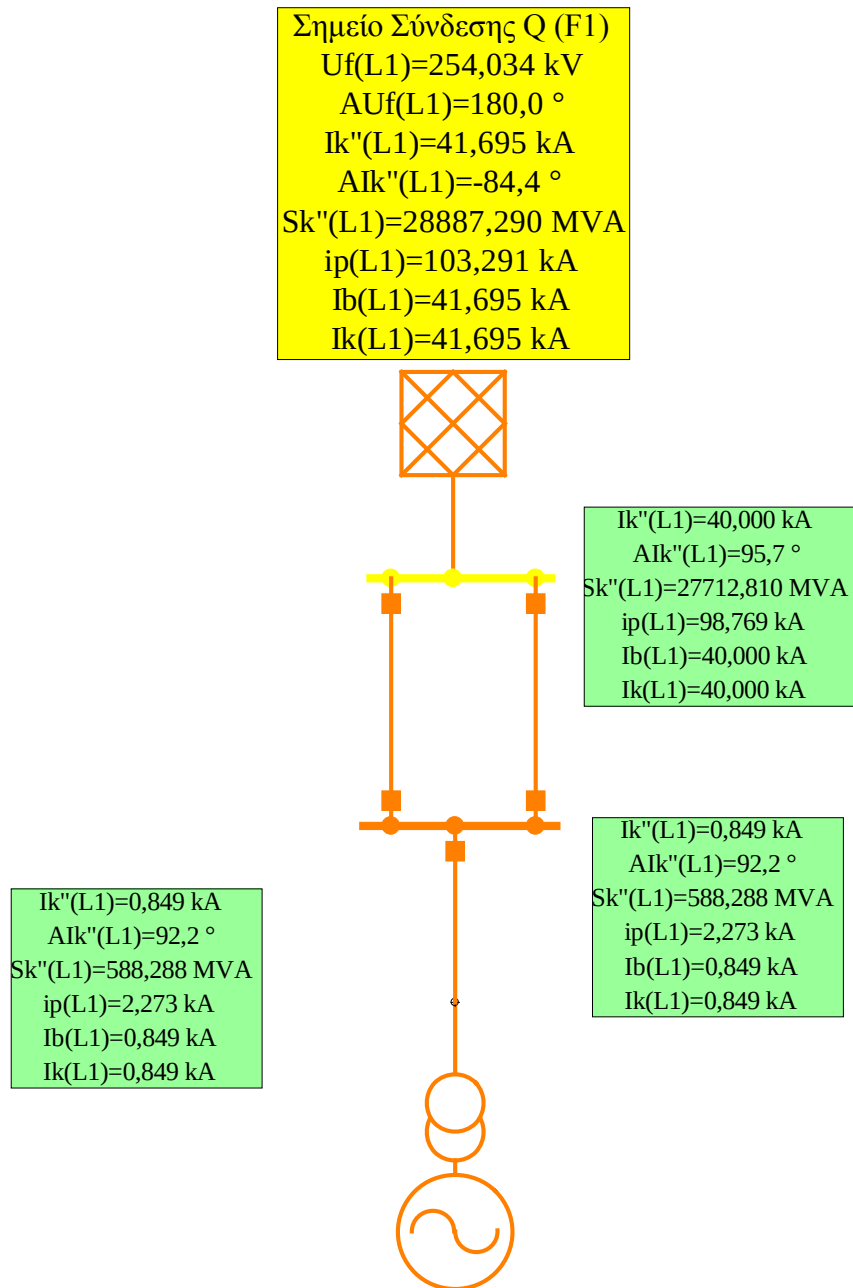
OK Άκυρο Εφαρμογή Βοήθεια

Σχήμα 4.10: Εισαγωγή παραμέτρων βραχυκυκλώματος στη σχετική καρτέλα

Στους πίνακες 11 έως και 24 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών εντάσεων βραχυκυκλώσεως, μονοφασικών και τριφασικών σφαλμάτων, στις θέσεις F1 έως F4. Στον Πίνακα 25 αναγράφονται επίσης τα αποτελέσματα των υπολογισμών με το χέρι, παρουσιάζεται δε και η διαφορά υπολογισμού εν σχέσει με του NEPLAN. Τέλος σχολιάζονται τα αποτελέσματα σε σχέση με τις απαιτήσεις του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του σταθμού.

4.7.3 Υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου

Τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό των 400 kV



Σχήμα 4.11: Μονογραμμικό διάγραμμα και αποτελέσματα τριφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου

Πίνακας 11 - Μέγιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος στη θέση F1 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

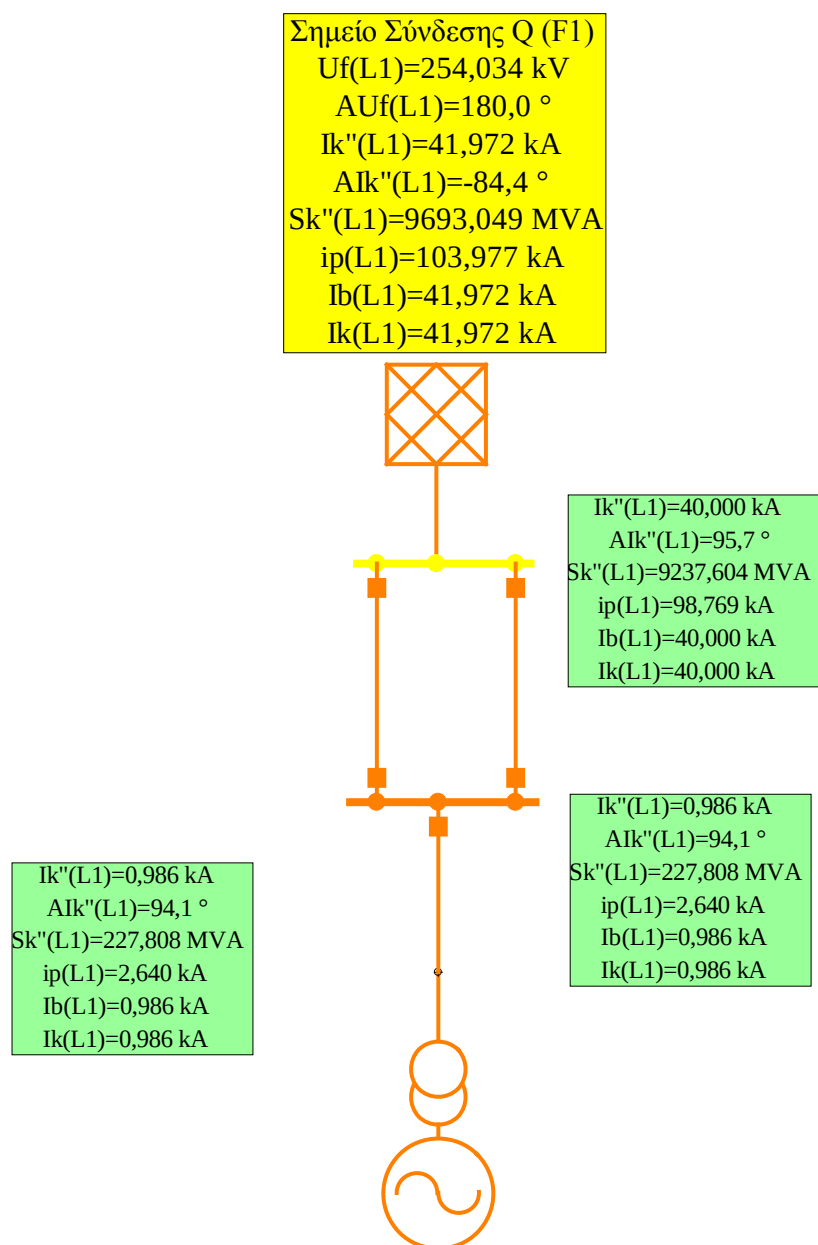
A/A	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk" (RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
1	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Faulted			41,695	-84,43	103,291	41,695	41,695	42,419	28887,29
2	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Δίκτυο Τροφοδοτήσεως 400 kV	Network Feeder	40	95,71	98,769	40	40	40,677	27712,81
3	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Γραμμή Μετ. 2	Line	0,849	92,22	2,273	0,849	0,849	0,886	588,288
4	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Γραμμή Μετ. 1	Line	0,849	92,22	2,273	0,849	0,849	0,886	588,288

Πίνακας 12 - Ελάχιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος στη θέση F1 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

A/A	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk" (RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
1	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Faulted			11,241	-84,75	28,052	11,241	10,982	11,449	7788,287
2	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Δίκτυο Τροφοδοτήσεως 400 kV	Network Feeder	9,7	95,71	23,951	9,7	9,7	9,864	6720,357
3	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Γραμμή Μετ. 2	Line	0,772	92,36	2,059	0,772	0,642	0,803	534,755
4	Σημείο Συνδέσεως Q (F1)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Γραμμή Μετ. 1	Line	0,772	92,36	2,059	0,772	0,642	0,803	534,755

4.7.4 Υπολογισμός μονοφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου

Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό των 400 kV



Σχήμα 4.12: Μονογραμμικό διάγραμμα και αποτελέσματα μονοφασικού βραχυκυκλώματος στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου

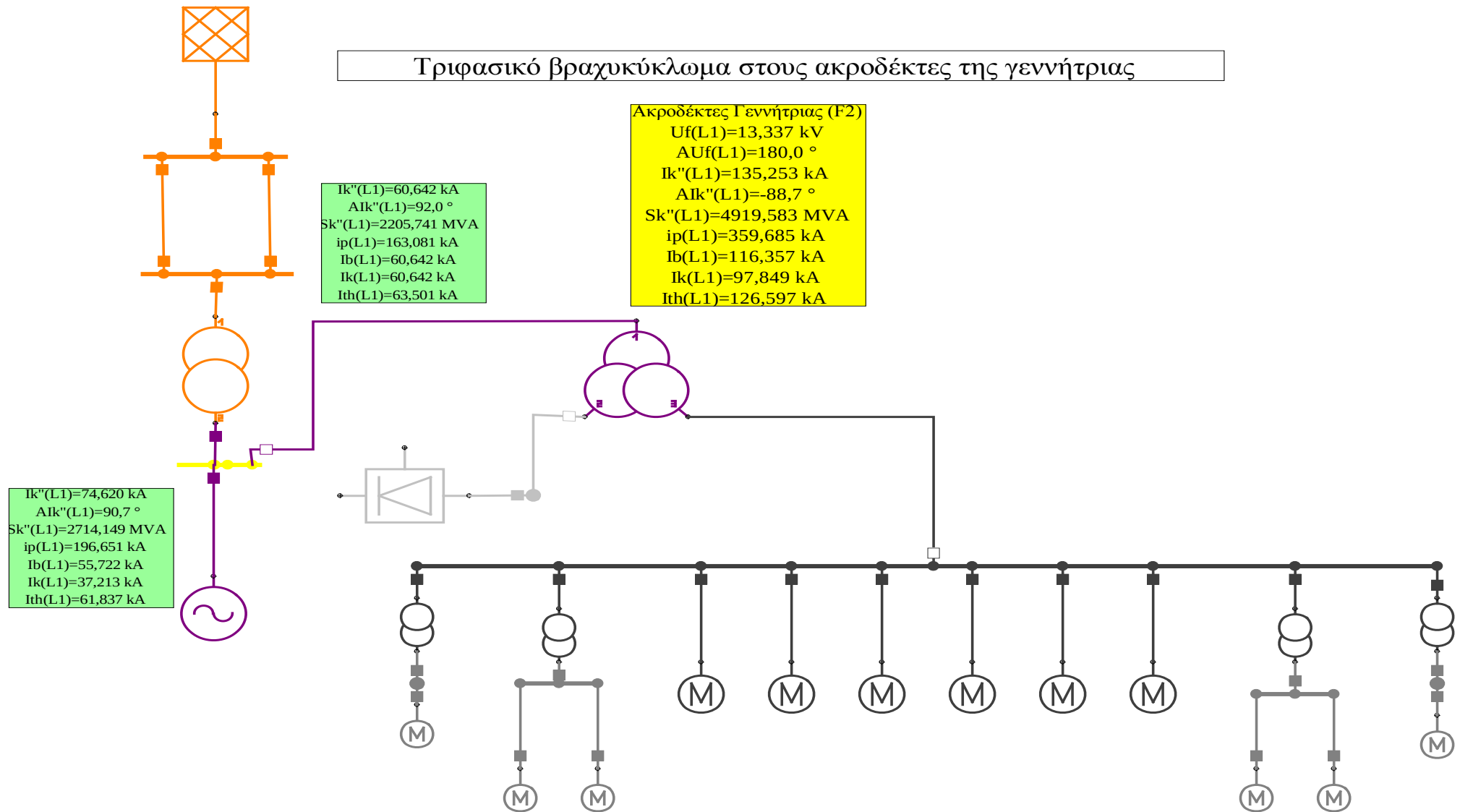
Πίνακας 13 - Μέγιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως μονοφασικού σφάλματος στη θέση F1 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk" (RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
R	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Faulted			41,972	-84,36	103,977	41,972	41,972	42,701	9693,049
S					0	45	0	0	0	0	0
T					0	26,57	0	0	0	0	0
R	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Δίκτυο Τροφοδοτήσεως 400 kV	Network Feeder	40	95,71	98,769	40	40	40,677	9237,604
S					0,276	-75,44	0,683	0,276	0,276	0,281	63,833
T					0,278	-73,67	0,687	0,278	0,278	0,283	64,211
R	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Γραμμή Μετ. 2	Line	0,986	94,11	2,64	0,986	0,986	1,029	227,808
S					0,138	104,56	0,37	0,138	0,138	0,144	31,916
T					0,139	106,33	0,372	0,139	0,139	0,145	32,106
R	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Γραμμή Μετ. 1	Line	0,986	94,11	2,64	0,986	0,986	1,029	227,808
S					0,138	104,56	0,37	0,138	0,138	0,144	31,916
T					0,139	106,33	0,372	0,139	0,139	0,145	32,106

Πίνακας 14 - Ελάχιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως μονοφασικού σφάλματος στη θέση F1 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk" (RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
R	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Faulted			11,782	-84,44	29,394	11,782	11,782	11,999	2721,036
S					0	180	0	0	0	0	0
T					0	180	0	0	0	0	0
R	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Δίκτυο Τροφοδοτήσεως 400 kV	Network Feeder	10	95,71	24,692	10	10	10,169	2309,401
S					0,221	-71,27	0,545	0,221	0,221	0,224	50,955
T					0,222	-69,45	0,549	0,222	0,222	0,226	51,367
R	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Γραμμή Μετ. 2	Line	0,891	94,73	2,377	0,891	0,891	0,927	205,843
S					0,11	108,73	0,294	0,11	0,11	0,115	25,478
T					0,111	110,55	0,297	0,111	0,111	0,116	25,684
R	Σημείο συνδέσεως Q (F1)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Γραμμή Μετ. 1	Line	0,891	94,73	2,377	0,891	0,891	0,927	205,843
S					0,11	108,73	0,294	0,11	0,11	0,115	25,478
T					0,111	110,55	0,297	0,111	0,111	0,116	25,684

4.7.5 Υπολογισμός τριφασικού βραχυκλώματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας



Σχήμα 4.13: Μονογραμμικό διάγραμμα και αποτελέσματα τριφασικού βραχυκυκλώματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας

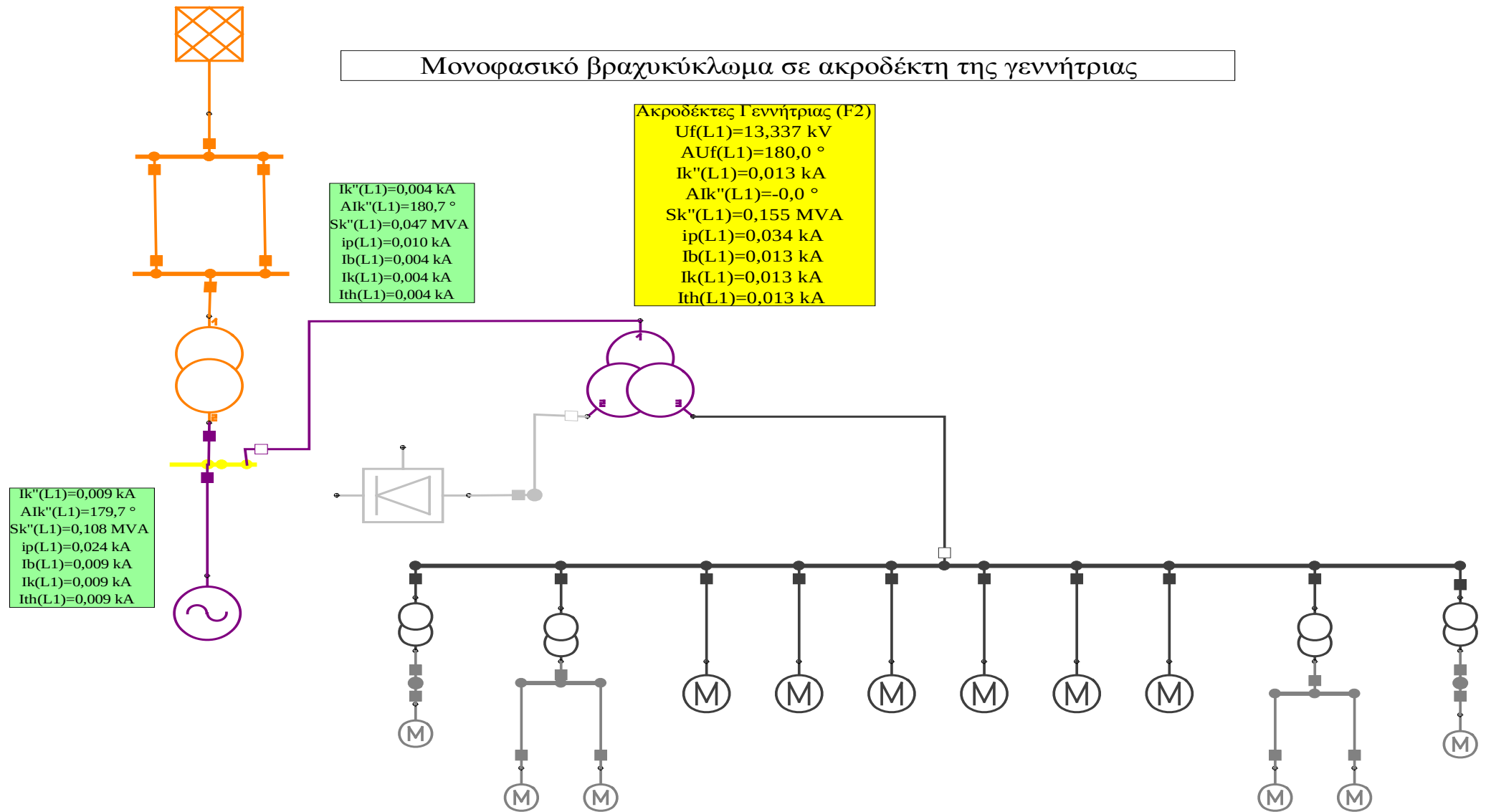
Πίνακας 15 - Μέγιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος στη θέση F2 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
1	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Faulted			135,253	-88,69	359,685	116,357	97,849	126,597	4919,583
2	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Μ/Σ Μονάδος	2W Transformer	60,642	92,02	163,081	60,642	60,642	63,501	2205,741
3	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Γεννήτρια Ε.Ρ.	Synchronous Machine	74,62	90,73	196,651	55,722	37,213	61,837	2714,149

Πίνακας 16 - Ελάχιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος στη θέση F2 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
1	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Faulted			113,055	-88,4	297,837	97,348	52,098	91,108	4112,159
2	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Μ/Σ Μονάδος	2W Transformer	45,238	92,9	119,114	45,238	45,238	46,735	1645,456
3	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Γεννήτρια Ε.Ρ.	Synchronous Machine	67,836	90,73	178,774	52,127	6,864	30	2467,409

4.7.6 Υπολογισμός μονοφασικού βραχυκλώματος σε ακροδέκτη της γεννήτριας



Σχήμα 4.14: Μονογραμμικό διάγραμμα και αποτελέσματα μονοφασικού βραχυκυκλώματος σε ακροδέκτη της γεννήτριας

Πίνακας 17 - Μέγιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως μονοφασικού σφάλματος στη θέση F2 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

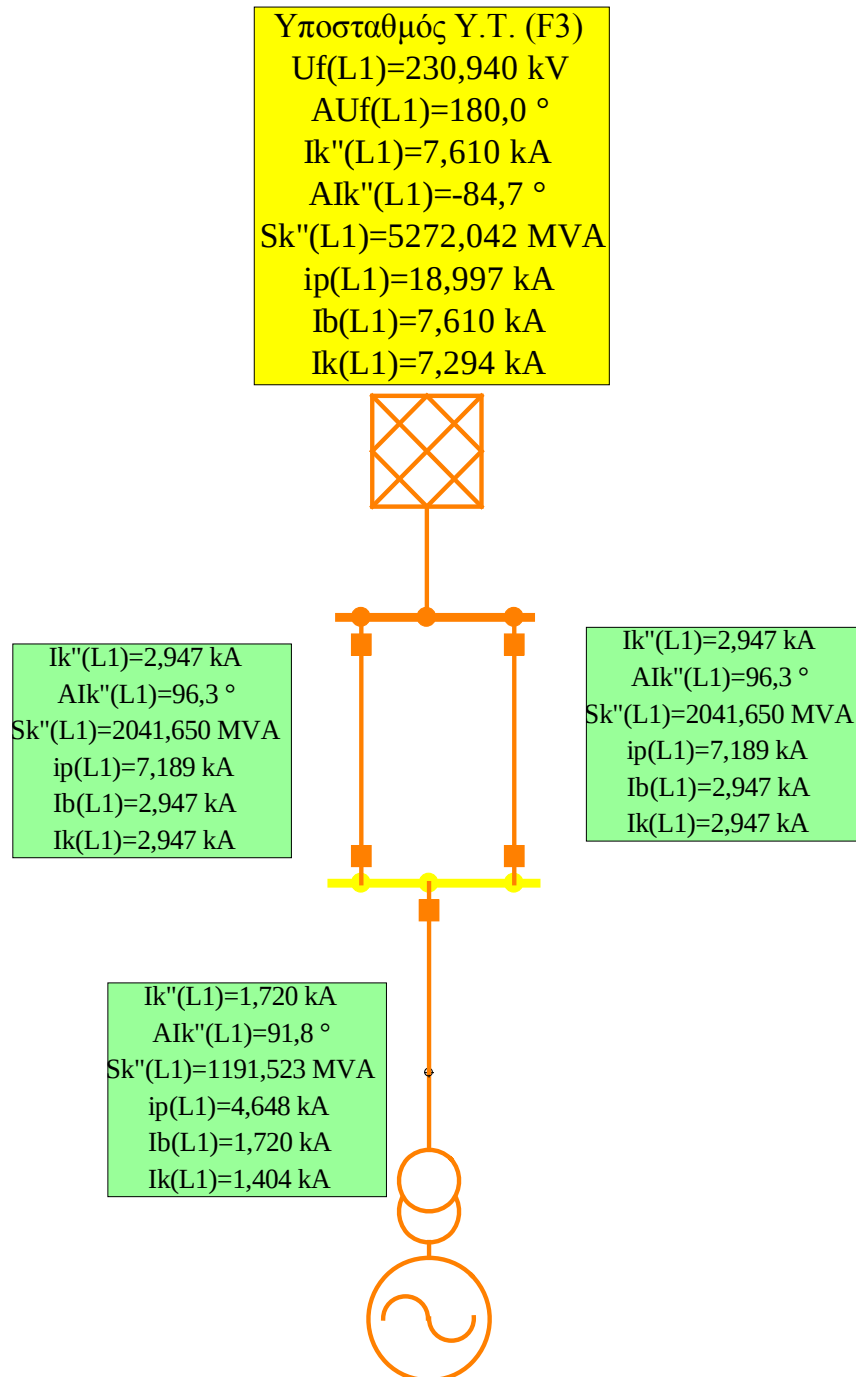
	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
R	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Faulted			0,013	-0,01	0,034	0,013	0,013	0,013	0,155
S					0	-90	0	0	0	0	0
T					0	-90	0	0	0	0	0
R	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Μ/Σ Μονάδος	2W Transformer	0,004	180,71	0,01	0,004	0,004	0,004	0,047
S					0,002	0,18	0,005	0,002	0,002	0,002	0,023
T					0,002	1,24	0,005	0,002	0,002	0,002	0,023
R	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Γεννήτρια Ε.Ρ.	Synchronous Machine	0,009	179,69	0,024	0,009	0,009	0,009	0,108
S					0,002	180,18	0,005	0,002	0,002	0,002	0,023
T					0,002	181,24	0,005	0,002	0,002	0,002	0,023

Πίνακας 18 - Ελάχιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως μονοφασικού σφάλματος στη θέση F2 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
R	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Faulted			0,012	-0,01	0,031	0,012	0,012	0,012	0,141
S					0	-90	0	0	0	0	0
T					0	-90	0	0	0	0	0
R	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Υποσταθμός Υ.Τ.	Μ/Σ Μονάδος	2W Transformer	0,003	181,28	0,008	0,003	0,003	0,003	0,038
S					0,002	0,7	0,004	0,002	0,002	0,002	0,019
T					0,002	1,85	0,004	0,002	0,002	0,002	0,019
R	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Ακροδέκτες Γεννήτριας (F2)	Γεννήτρια Ε.Ρ.	Synchronous Machine	0,008	179,52	0,022	0,008	0,008	0,009	0,103
S					0,002	180,7	0,004	0,002	0,002	0,002	0,019
T					0,002	181,85	0,004	0,002	0,002	0,002	0,019

4.7.7 Υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στον υποσταθμό Υ.Τ.

Τριφασικό βραχυκύκλωμα στον Υποσταθμό Υ.Τ.



Σχήμα 4.15: Μονογραμμικό διάγραμμα και αποτελέσματα τριφασικού βραχυκυκλώματος στον υποσταθμό Υ.Τ.

Πίνακας 19 - Μέγιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος στη θέση F3 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
1	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Faulted			13,601	-84,81	33,987	13,601	13,601	13,855	9423,091
2	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Σημείο συνδέσεως Q	Γραμμή Μετ. 2	Line	5,857	95,74	14,452	5,857	5,857	5,955	4057,532
3	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Σημείο συνδέσεως Q	Γραμμή Μετ. 1	Line	5,857	95,74	14,452	5,857	5,857	5,955	4057,532
4	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Ηλεκτροπαραγωγός Μονάδα	PS-Block	1,892	91,81	5,113	1,892	1,892	1,991	1310,675

Πίνακας 20 - Ελάχιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος στη θέση F3 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
1	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Faulted			7,61	-84,74	18,997	7,61	7,294	7,75	5272,042
2	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Σημείο συνδέσεως Q	Γραμμή Μετ. 2	Line	2,947	96,26	7,189	2,947	2,947	2,992	2041,65
3	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Σημείο συνδέσεως Q	Γραμμή Μετ. 1	Line	2,947	96,26	7,189	2,947	2,947	2,992	2041,65
4	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Ηλεκτροπαραγωγός Μονάδα	PS-Block	1,72	91,81	4,648	1,72	1,404	1,81	1191,523

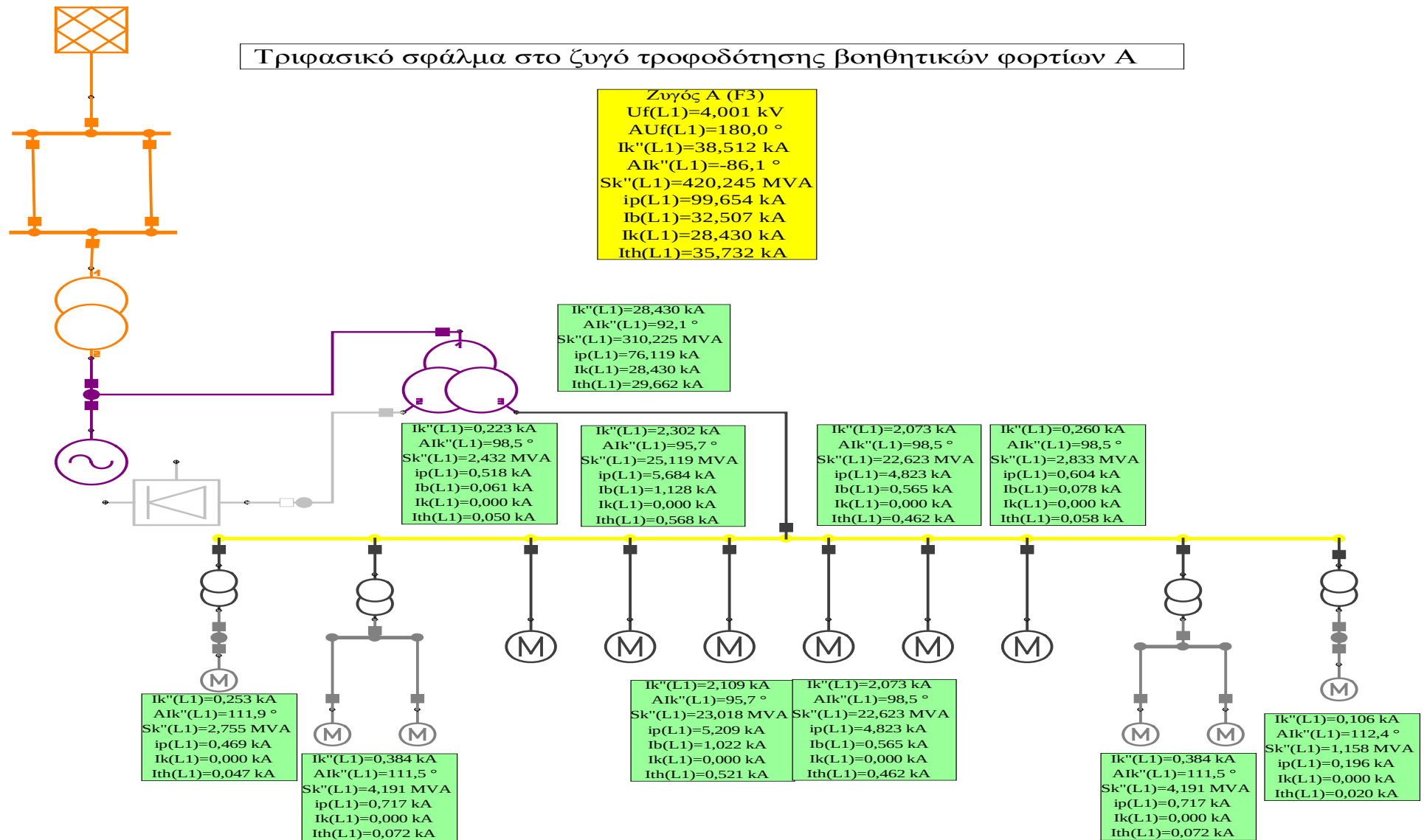
Πίνακας 21 - Μέγιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως μονοφασικού σφάλματος στην θέση F3 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk"(RS T)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
R	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Faulted			12,012	-82,99	30,017	12,012	12,012	12,237	2774,11 2
S					0	-45	0	0	0	0	0
T					0	-26,57	0	0	0	0	0
R	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Σημείο συνδέσεως Q	Γραμμή Μετ. 2	Line	4,638	99,13	11,446	4,638	4,638	4,716	1071,17 8
S					0,555	264,08	1,369	0,555	0,555	0,564	128,109
T					0,554	264,51	1,367	0,554	0,554	0,563	127,91
R	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Σημείο συνδέσεως Q	Γραμμή Μετ. 1	Line	4,638	99,13	11,446	4,638	4,638	4,716	1071,17 8
S					0,555	264,08	1,369	0,555	0,555	0,564	128,109
T					0,554	264,51	1,367	0,554	0,554	0,563	127,91
R	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Ηλεκτροπαραγωγός Μονάδα	PS- Block	2,763	89,89	7,469	2,763	2,763	2,908	638,135
S					1,109	84,08	2,999	1,109	1,109	1,168	256,218
T					1,108	84,51	2,994	1,108	1,108	1,166	255,82

Πίνακας 22 - Ελάχιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως μονοφασικού σφάλματος στην θέση F3 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	AIk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
R	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Faulted			7,596	-83,76	18,955	7,596	7,596	7,737	1754,323
S					0	-90	0	0	0	0	0
T					0	-90	0	0	0	0	0
R	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Σημείο Σύνδεσης Q	Γραμμή Μετ. 2	Line	2,617	98,93	6,384	2,617	2,617	2,658	604,47
S					0,35	264,15	0,854	0,35	0,35	0,355	80,847
T					0,349	264,78	0,852	0,349	0,349	0,355	80,673
R	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Σημείο Σύνδεσης Q	Γραμμή Μετ. 1	Line	2,617	98,93	6,384	2,617	2,617	2,658	604,47
S					0,35	264,15	0,854	0,35	0,35	0,355	80,847
T					0,349	264,78	0,852	0,349	0,349	0,355	80,673
R	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Υποσταθμός Υ.Τ. (F3)	Ηλεκτροπαραγωγός Μονάδα	PS-Block	2,38	90,33	6,433	2,38	2,38	2,505	549,631
S					0,7	84,15	1,892	0,7	0,7	0,737	161,694
T					0,699	84,78	1,888	0,699	0,699	0,735	161,346

4.7.9 Υπολογισμός τριφασικού βραχυκυκλώματος στον ζυγό Α των 6.3 kV



Σχήμα 4.17: Μονογραμμικό διάγραμμα και αποτελέσματα τριφασικού βραχυκυκλώματος στον ζυγό Α των 6.3 kV

Πίνακας 23 - Μέγιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος στη θέση F4 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	Alk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
1	Ζυγός Α	Faulted			38,512	-86,13	99,654	32,507	28,43	35,732	420,245
2	Ζυγός Α	Δίκτυο Χ.Τ. 0,42 kV	Μ/Σ Χ.Τ. 2	2W Transformer	0,384	111,47	0,717		0	0,072	4,191
3	Ζυγός Α	Δίκτυο Χ.Τ. 0,42 kV	Μ/Σ Χ.Τ. 3	2W Transformer	0,384	111,47	0,717		0	0,072	4,191
4	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ1	Asynchronous Machine	0,223	98,53	0,518		0	0,05	2,432
5	Ζυγός Α	Δίκτυο Χ.Τ. 0,42 kV	Μ/Σ Χ.Τ. 1	2W Transformer	0,253	111,92	0,469		0	0,047	2,755
6	Ζυγός Α	Δίκτυο Χ.Τ. 0,42 kV	Μ/Σ Χ.Τ. 4	2W Transformer	0,106	112,42	0,196		0	0,02	1,158
7	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ2	Asynchronous Machine	2,302	95,71	5,684		0	0,568	25,119
8	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ3	Asynchronous Machine	2,109	95,71	5,209		0	0,521	23,018
9	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ4	Asynchronous Machine	2,073	98,53	4,823		0	0,462	22,623
10	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ5	Asynchronous Machine	2,073	98,53	4,823		0	0,462	22,623
11	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ6	Asynchronous Machine	0,26	98,53	0,604		0	0,058	2,833
12	Ζυγός Α	Ακροδέκτες Γεννήτριας	Μ/Σ Βοηθητικών	3W Transformer	28,43	92,14	76,119		28,43	29,662	310,225

Πίνακας 24 - Ελάχιστες εντάσεις βραχυκυκλώσεως τριφασικού σφάλματος στη θέση F4 και η συνεισφορά των επιμέρους στοιχείων σε αυτές

	Fault location From Node	To Node	Element name	Type	Ik" (RST)	Alk"(RST)	ip (RST)	Ib (RST)	Ik (RST)	Ith (RST)	Sk" (RST)
					kA	°	kA	kA	kA	kA	MVA
1	Ζυγός Α	Faulted			25,749	-87,85	68,908	25,749	25,749	26,855	280,975
2	Ζυγός Α	Δίκτυο Χ.Τ. 0,42 kV	Μ/Σ Χ.Τ. 2	2W Transformer	0	104,04	0		0	0	0
3	Ζυγός Α	Δίκτυο Χ.Τ. 0,42 kV	Μ/Σ Χ.Τ. 3	2W Transformer	0	104,04	0		0	0	0
4	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ1	Asynchronous Machine	0	-90	0		0	0	0
5	Ζυγός Α	Δίκτυο Χ.Τ. 0,42 kV	Μ/Σ Χ.Τ. 1	2W Transformer	0	104,04	0		0	0	0
6	Ζυγός Α	Δίκτυο Χ.Τ. 0,42 kV	Μ/Σ Χ.Τ. 4	2W Transformer	0	104,04	0		0	0	0
7	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ2	Asynchronous Machine	0	-90	0		0	0	0
8	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ3	Asynchronous Machine	0	-90	0		0	0	0
9	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ4	Asynchronous Machine	0	-90	0		0	0	0
10	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ5	Asynchronous Machine	0	-90	0		0	0	0
11	Ζυγός Α	Ζυγός Α (F3)	Μ.Τ. Μ6	Asynchronous Machine	0	-90	0		0	0	0
12	Ζυγός Α	Ακροδέκτες Γεννήτριας	Μ/Σ Βοηθητικών	3W Transformer	25,749	92,15	68,908		25,749	26,855	280,975

4.8 Σχόλια

Ο αναλυτικός υπολογισμός των εντάσεων βραχυκυκλώσεως στο ζυγό των 400 kV του άπειρου δικτύου και στους ακροδέκτες της γεννήτριας ταυτίζεται με τον υπολογισμό του λογισμικού NEPLAN για μονοφασικό & τριφασικό βραχυκύκλωμα στις συγκεκριμένες θέσεις σφάλματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση τριφασικού σφάλματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας παρατηρείται σημαντική διαφορά όσον αφορά τη συνεισφορά της γεννήτριας στην ένταση βραχυκυκλώσεως μονίμου καταστάσεως I_k . Αυτή οφείλεται στην απώλεια της διεγέρσεως σε περίπτωση τριφασικού σφάλματος στους ακροδέκτες αυτοδιεγειρόμενης γεννήτριας, γεγονός που δεν λαμβάνει υπόψη το λογισμικό NEPLAN.

Πίνακας 25 - Σύγκριση αποτελεσμάτων υπολογισμού με το χέρι και υπολογισμού μέσω του λογισμικού NEPLAN

			Αποτελέσματα υπολογισμού με το χέρι		Αποτελέσματα υπολογισμού με το NEPLAN		Απόκλιση μεταξύ αποτελεσμάτων τοις εκατό (%)	
			max	min	max	min	Δlmax	Δlmin
Τριφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό των 400 kV	Ik"	kA	41,694	11,241	41,695	11,241	0,00	0,00
	ip		103,317	28,072	103,291	28,052	0,03	0,07
	Ib		41,63	11,22	41,695	11,241	0,16	0,19
	Ik		41,443	10,025	41,695	10,982	0,60	8,71
Μονοφασικό βραχυκύκλωμα στο ζυγό των 400 kV	Ik1"		41,972	11,76	41,972	11,782	0,00	0,19
	ip1		104	29,402	103,977	29,394	0,02	0,03
	Ib1		41,972	11,76	41,972	11,782	0,00	0,19
	Ik1"		41,972	11,76	41,972	11,782	0,00	0,19
Τριφασικό βραχυκύκλωμα στους ακροδέκτες της γεννήτριας	Ik"		135,28	113,09	135,253	113,055	0,02	0,03
	ip		359,8	297,9	359,685	297,837	0,03	0,02
	Ib		116,37	97,368	116,357	97,348	0,01	0,02
	Ik		60,642	45,238	97,849	52,098	38,02	13,17
Μονοφασικό βραχυκύκλωμα σε ακροδέκτη της γεννήτριας	Ik1"		0,013	0,012	0,013	0,012	0,00	0,00
	ip1		0,035	0,031	0,034	0,031	2,94	0,00
	Ib1		0,013	0,012	0,013	0,012	0,00	0,00
	Ik1"		0,013	0,012	0,013	0,012	0,00	0,00

Επιλέχθηκε η διεξαγωγή υπολογισμού βραχυκυκλωμάτων (μονοφασικών και τριφασικών) σε τέσσερις θέσεις: στους ζυγούς των 400 kV του άπειρου δικτύου, στους ακροδέκτες της γεννήτριας, στην πλευρά Υ.Τ. του Μ/Σ μονάδος και στο ζυγό τροφοδοτήσεως των βοηθητικών μονάδος.

Σύμφωνα με τα εξαγόμενα αποτελέσματα μεταξύ των τεσσάρων εξετασθεισών θέσεων μονοφασικού βραχυκυκλώματος η μέγιστη αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως, I''_{k1} , προέκυψε για την περίπτωση σφάλματος στους ζυγούς των 400 kV του άπειρου δικτύου (41.972 kA). Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη συνεισφορά προήλθε από το άπειρο σύστημα (40 kA ή 95.3% του συνόλου), το δε υπόλοιπο 4.7% από την μονάδα παραγωγής. Στην περίπτωση σφάλματος στην πλευρά Υ.Τ. του Μ/Σ μονάδος η I''_{k1} ανήλθε σε 12.012 kA, με το άπειρο δίκτυο να συνεισφέρει το 77.2% και την μονάδα παραγωγής το υπόλοιπο 23.8% περίπου. Στην περίπτωση σφάλματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας η I''_{k1} ανήλθε σε 13 A μόνον, λόγω της υψηλής αντιστάσεως γειώσεως του κόμβου της γεννήτριας.

Αναλόγως, μεταξύ των τεσσάρων εξετασθεισών θέσεων τριφασικού βραχυκυκλώματος η μέγιστη αρχική συμμετρική ένταση βραχυκυκλώσεως, I''_k , προέκυψε για την περίπτωση σφάλματος στους ακροδέκτες της γεννήτριας (135.253 kA). Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη συνεισφορά προήλθε από τη μονάδα παραγωγής (74.620 kA ή 55.2% του συνόλου), το δε υπόλοιπο 44.8% περίπου από το άπειρο σύστημα. Στην περίπτωση σφάλματος στους ζυγούς των 400 kV η I''_k ανήλθε σε 41.694 kA, με το άπειρο δίκτυο να συνεισφέρει το 96% και την μονάδα παραγωγής το υπόλοιπο 4% περίπου. Στην περίπτωση σφάλματος στην πλευρά Υ.Τ. του Μ/Σ μονάδος η I''_k ανήλθε σε 13.601 kA, προερχόμενη κατά 86% από το άπειρο σύστημα και κατά το υπόλοιπο 14% περίπου από την μονάδα παραγωγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Μεταβατική μελέτη σταθμού παραγωγής & το πρόγραμμα ΕΜΤΡ/ΑΤΡ

5.1 Γενικά περί μεταβατικής ευστάθειας

Γενικά ως ευστάθεια ενός Σ.Η.Ε. ορίζεται η ικανότητα αυτού να παραμένει σε κατάσταση λειτουργικής ισορροπίας υπο κανονικές συνθήκες λειτουργίας και να επιστρέφει σε μια αποδεκτή σταθερή κατάσταση λειτουργίας μετά το πέρας μιας οποιασδήποτε διαταραχής. Η μεταβατική ευστάθεια ενός Σ.Η.Ε. αναφέρεται σε μεγάλες διαταραχές όπως η απότομη είσοδος/έξοδος ενός μεγάλου καταναλωτή, η απότομη (απρογραμματίστη) έξοδος ενός σημαντικής ισχύος σταθμού παραγωγής, βραχυκυκλώματα, κ.λ.π..

Βασικό κριτήριο για την ευστάθεια ενός Σ.Η.Ε. είναι οι γεννήτριες του να παραμείνουν σε συγχρονισμό μετά τη λήξη της μεταβατικής περιόδου, ήτοι μετά το πέρας της διαταραχής να επιστρέψουν σε μία αποδεκτή μόνιμη κατάσταση. Τουτέστιν το πρόβλημα της ευστάθειας σχετίζεται άμεσα με την δυναμική συμπεριφορά των σύγχρονων γεννητριών των σταθμών παραγωγής.

Οι διαταραχές του δικτύου έχουν ως αποτέλεσμα την ανισορροπία μεταξύ της μηχανικής ισχύος εισόδου και της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου των γεννητριών. Αυτή οδηγεί στη δημιουργία ροπής επιταχύνσεως ή επιβραδύνσεως στους δρομείς αυτών. Η αναπτυσσόμενη ροπή δύναται να προκαλέσει ολίσθηση πόλων της σύγχρονης γεννήτριας, δηλαδή η γωνία μετατόπισης του μαγνητικού άξονα του δρομέα της σε σχέση με το σύγχρονα στρεφόμενο άξονα αναφοράς να ξεπεράσει τα 2π rad (360°). Πολλαπλές ολισθήσεις πόλων εντός μικρού χρονικού διαστήματος οδηγούν στον αποσυγχρονισμό της γεννήτριας.

Για τη διερεύνηση των προβλημάτων που σχετίζονται με τη μεταβατική ευστάθεια, απαιτείται η χρήση δυναμικών μοντέλων τόσο για τις σύγχρονες γεννήτριες των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων όσο και για τους ρυθμιστές τάσεως – άεργης ισχύος και τους σταθεροποιητές ισχύος. Η ανάλυση πραγματοποιείται στο πεδίο του χρόνου μέσω ειδικών προγραμμάτων και έχει ως στόχο την εύρεση του

κρίσιμου χρόνου εκκαθαρίσεως της διαταραχής, εντός του οποίου το σύστημα διατηρεί την ευστάθεια του.

5.2 Περί μεταβατικής μελέτης

Σκοπός της ανάλυσης είναι να μελετήσει την μεταβατική ευστάθεια της γεννήτριας εν σχέσει προς επιλεγμένο σφάλμα, ήτοι να εξακριβωθεί η δυνατότητα της σύγχρονης μηχανής να παραμείνει σε συγχρονισμό έπειτα από συγκεκριμένη διαταραχή στο σύστημα.

Ως σφάλμα επιλέγεται το τριφασικό βραχυκύκλωμα στην αρχή της μίας από τις δύο εναέριες γραμμές μεταφοράς των 400 kV. Αντικείμενο του ενδιαφέροντός μας αποτελεί ο προσδιορισμός του κρίσιμου χρόνου εκκαθαρίσεως του σφάλματος, πέραν του οποίου η γεννήτρια εμφανίζει ολίσθηση πόλων ή απώλεια συγχρονισμού.

Το σφάλμα θεωρείται ότι εμφανίζεται την χρονική στιγμή $t=1s$ και διαρκεί μεταβλητό διάστημα, ώστε να ευρεθεί ο κρίσιμος χρόνος εκκαθαρίσεως, ο οποίος εξαρτάται μεταξύ άλλων από την ενεργό και άεργο ισχύ της γεννήτριας πριν το σφάλμα καθώς και τη σταθερά αδράνειας του στρεφόμενου άξονα. Από την μελέτη προσδιορίζεται η θετική δράση του ρυθμιστή τάσεως και του σταθεροποιητή ισχύος, παρουσιάζονται δε χρήσιμα διαγράμματα για την διακύμανση των κύριων ηλεκτρικών μεγεθών.

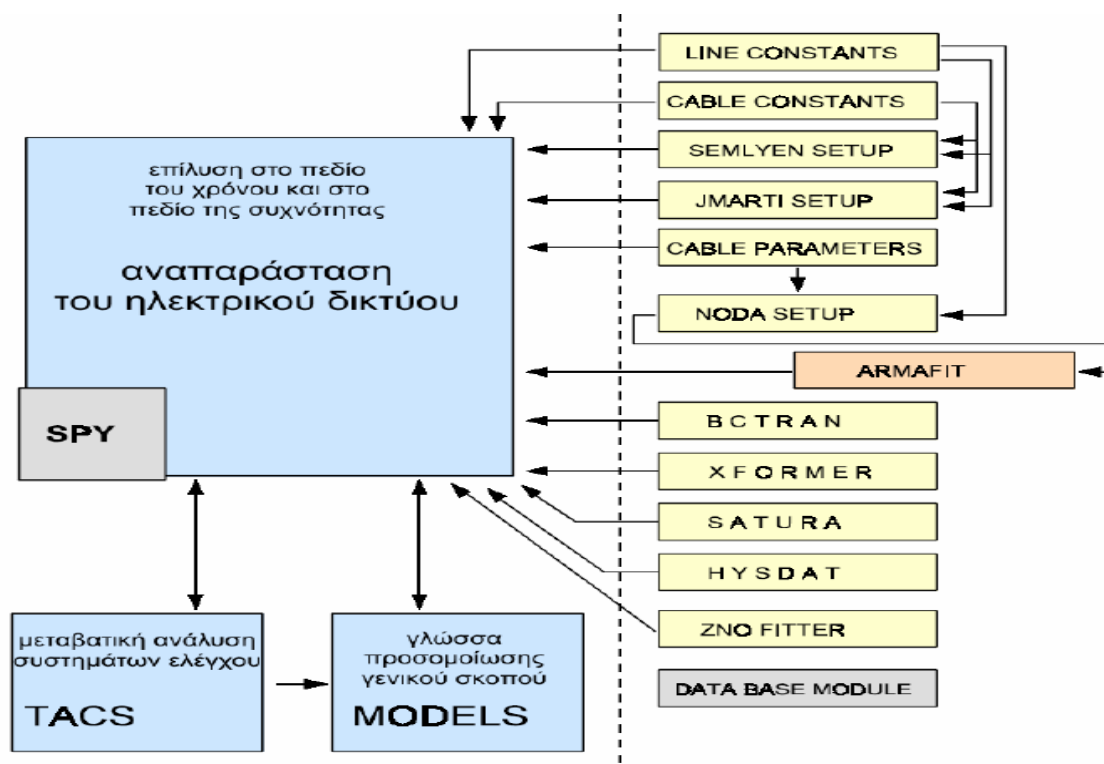
Δεδομένου ότι η μονάδα μπορεί να λειτουργήσει και σε ανοικτό κύκλο, ήτοι με συνεισφορά ισχύος μόνο από τον αεριοστρόβιλο, προχωρούμε σε μεταβατική μελέτη και για την περίπτωση αυτή, όπου η σταθερά αδρανείας είναι σημαντικά μειωμένη. Πράγματι σε λειτουργία ανοικτού κύκλου ο συμπλέκτης SSS αποσμπλέκει τον ατμοστρόβιλο, βλέπε σχ. 3.7, οπότε η στρεφόμενη αδράνεια του συγκροτήματος μειώνεται σημαντικά.

Η μεταβατική μελέτη πραγματοποιείται με το πρόγραμμα EMTP/ATP, ενώ χρησιμοποιείται και ο γραφικός προεπεξεργαστής ATPDraw για την εισαγωγή των δεδομένων και την δημιουργία του σχετικού εκτελέσιμου αρχείου.

5.3 Το πρόγραμμα EMTP/ATP

Το πρόγραμμα ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων (EMTP) είναι ένα γενικό και επαρκές λογισμικό, χρησιμοποιούμενο από πλείστες εταιρείες ηλεκτρισμού σε όλο τον κόσμο. Το πρόγραμμα αρχικώς ανεπτύχθη κατά τα τέλη του 1960 από τον Δρ. Hermann Dommel, ο οποίος παρουσίασε το πρόγραμμα στην Bonneville Power Administration (BPA). Η BPA εκτίμησε το πρόγραμμα και προέβη μαζί με άλλους μελετητές σε επεκτάσεις και βελτιώσεις. Σήμερα το πρόγραμμα αναγνωρίζεται ως ένα ιδιαίτερα επιτυχημένο πρόγραμμα ηλεκτρομαγνητικών μεταβατικών φαινομένων, έχει δε εφοδιαστεί με υποπρογράμματα (TACS, MODELS) κατάλληλα για την προσομοίωση συστημάτων ελέγχου.

Το πρόγραμμα μπορεί να λειτουργήσει σε ποικίλα περιβάλλοντα, διαθέτει δε πληθώρα υποστηρικτικών υποπρογραμμάτων, για την προσομοίωση μετασχηματιστών (BCTAN, XFORMER), για την προσομοίωση του κορεσμού και της μαγνητικής υστέρησης (SATURATION, HYSTERESIS), για τον υπολογισμό των παραμέτρων καλωδίων (CABLE CONSTANTS) κλπ. Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα διατίθεται, μετά από σχετική αίτηση, χωρίς κόστος.



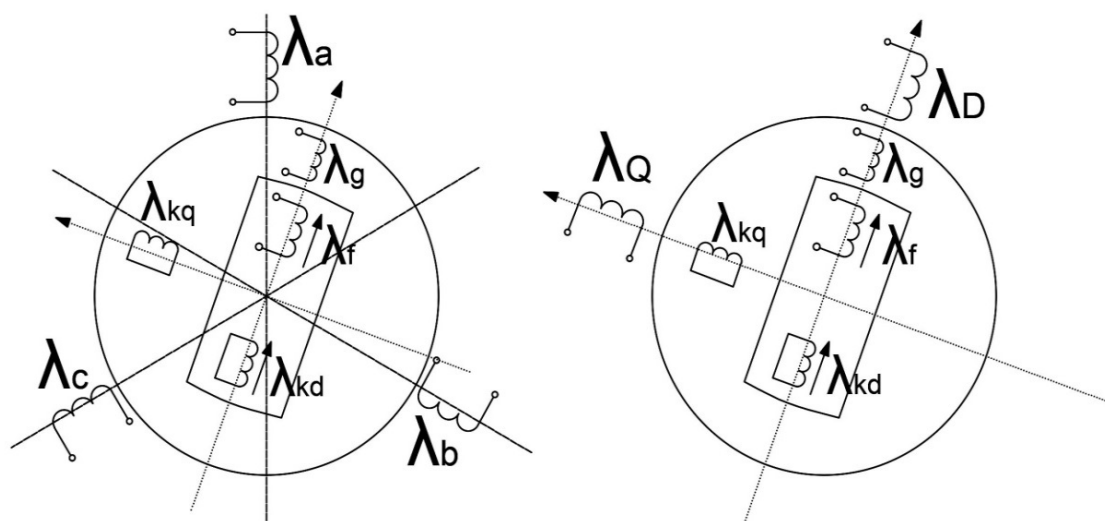
Σχήμα 5.1: Μέθοδος επίλυσης και υποστηρικτικές υπορουτίνες του προγράμματος EMTP/ATP^{5.1}

5.4 Προσομοίωση γεννήτριας E.P.

Το EMTP/ATP αναπαριστά συμβατικές, συμμετρικές ως προς τις φάσεις στάτη, δυναμικές σύγχρονες μηχανές μέσω της μονάδας 'Type 59 3-Phase S.M.'. Το πρότυπο της τριφασικής σύγχρονης μηχανής αναπαριστά με λεπτομέρεια τόσο το ηλεκτρομαγνητικό μέρος της γεννήτριας όσο και το μηχανικό μέρος του άξονος γεννήτριας και κινητήριων μηχανών.

Το πρότυπο της τριφασικής σύγχρονης μηχανής θεωρεί την ύπαρξη των ακόλουθων αμοιβαία συζευγμένων τυλιγμάτων:

- τρία τυλίγματα στάτη a, b, c ένα ανά φάση, συνδεδεμένα στο δίκτυο. Η χωρική μετατόπιση μεταξύ των φάσεων είναι 120° (ηλεκτρικές μοίρες),
- ένα τύλιγμα πεδίου f το οποίο παράγει ροή στον ορθό άξονα,
- ένα υποθετικό τύλιγμα kd στον ορθό άξονα, το οποίο αντιπροσωπεύει το φαινόμενο αποσβέσεως των μπαρών αποσβέσεως,
- ένα υποθετικό τύλιγμα g στον ορθό άξονα, το οποίο αντιπροσωπεύει το φαινόμενο των δινορρευμάτων και
- ένα υποθετικό τύλιγμα kq στον εγκάρσιο άξονα, το οποίο αντιπροσωπεύει το φαινόμενο αποσβέσεως των μπαρών αποσβέσεως.



Σχήμα 5.2: Μετασχηματισμός Park σε σύγχρονη γεννήτρια

Το πρότυπο τριφασικής μηχανής που χρησιμοποιείται από την μέθοδο επιλύσεως του προγράμματος EMTP/ATP βασίζεται στον μετασχηματισμό Park των

τριών τυλιγμάτων του στάτη σε δύο πλασματικά τυλίγματα, τοποθετημένα στον ορθό d και στον εγκάρσιο q άξονα, και σε ένα τρίτο στατικό τύλιγμα 0, μη συζευγμένο προς τα άλλα δυο. Οι συντελεστές των προκυπτουσών εξισώσεων είναι χρονικά αμετάβλητοι και ως εκ τούτου οι αυτεπαγωγές και οι αλληλεπαγωγές μεταξύ των τυλιγμάτων είναι σταθερές. Το ηλεκτρομαγνητικό μέρος περιγράφεται μέσω δύο ομάδων εξισώσεων, των τάσεων και των ροών – εντάσεων:

$$U = -Ri - \frac{d}{dx} \lambda \quad (5-1)$$

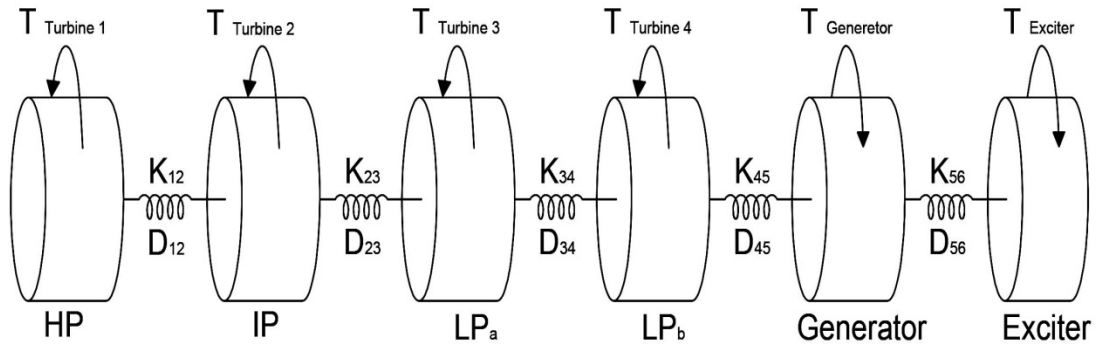
$$\lambda = Li \quad (5-2)$$

όπου U, R, L, i, λ είναι, αντίστοιχα, τα διανύσματα των τάσεων, των ωμικών αντιστάσεων, των αυτεπαγωγών, των ρευμάτων και των ροών των προαναφερθέντων τυλιγμάτων.

Γίνεται δεκτό ότι τα τυλίγματα στάτη είναι συνδεδεμένα κατά αστέρα, υπάρχει δε η δυνατότητα γειώσεως του κόμβου μέσω κλάδου R-L. Είναι δυνατή, βέβαια, η θεώρηση μηχανής με σύνδεση κατά τρίγωνο. Τα φαινόμενα κορεσμού μπορούν να ληφθούν υπόψη, μέσω της καμπύλης ανοικτοκυκλώματος ορθού και εγκάρσιου άξονα (dq). Η τάση η επιβαλλόμενη στο τύλιγμα πεδίου είναι σταθερή, ίση με την προσδιοριζόμενη κατά την αρχικοποίηση του προβλήματος. Υπάρχει επιπρόσθετα η δυνατότητα ελέγχου της τάσεως πεδίου μέσω ρυθμιστή τάσεως, με την βοήθεια των υποπρογραμμάτων TACS και MODELS.

Όσον αφορά το μηχανικό μέρος, ο χρήστης μπορεί να προσομοιώσει την γραμμή του άξονα θεωρώντας την ύπαρξη διακριτών στρεφόμενων μαζών όπως συμβαίνει, παραδείγματος χάρη, σε έναν άξονα ατμοστροβίλου - γεννήτριας.

Για την προσομοίωση άξονα πολλαπλών μαζών, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο συγκεντρωμένων μαζών συνδεδεμένων σε σειρά, μέσω ελατηρίων μηδενικής μάζας. Σε κάθε μάζα δίδεται μία μηχανική ισχύ η οποία μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη. Ο έλεγχος της μηχανικής ισχύος εισόδου είναι επίσης δυνατόν να ανατεθεί σε σχετικό σύστημα ελέγχου, π.χ. σε έναν ρυθμιστή στροβίλου.



Σχήμα 5.3 Άξονας ατμοστρόβιλου-γεννήτριας-διέγερσης (6 μαζών)^{5.2}

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση των διαφόρων στρεφόμενων μαζών, η μηχανική εξίσωση του άξονα, σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για την στροφική κίνηση, γράφεται ως εξής:

$$[J] \frac{d}{dt} [\omega] = [T_{\text{mech}}] - [T_{\text{elec}}] - [D][\omega] - [K][\theta] \quad (5-3)$$

όπου

$[J]$ είναι ο διαγώνιος πίνακας στρεφόμενων αδρανειών μάζας,

$[D]$ είναι ο τριδιαγώνιος πίνακας σταθερών αποσβέσεως,

$[\omega]$ είναι ο πίνακας στήλη γωνιακών ταχυτήτων μαζών $\omega = d\theta/dt$,

$[T_{\text{mech}}]$ είναι ο πίνακας στήλη των μηχανικών ροπών εισόδου, με μηδενικής τιμές όσον αφορά στη μάζα γεννήτριας και στη μάζα διεγέρτη,

$[T_{\text{elec}}]$ είναι ο πίνακας στήλη των ηλεκτρομαγνητικών ροπών, με μηδενικής τιμές όσον αφορά στις μάζες του στρόβιλου,

$[\theta]$ είναι ο πίνακας στήλη γωνιών μεταξύ των στρεφόμενων μαζών και του άξονα αναφοράς και

$[K]$ είναι ο τριδιαγώνιος πίνακας συντελεστών ελαστικότητας των ελατηρίων.

5.5 Προσομοίωση ρυθμιστή τάσεως & σταθεροποιητή ισχύος

Ο αυτόματος ρυθμιστής τάσεως (AVR) αποτελεί μία διάταξη αυτόματου ελέγχου, η οποία είτε διατηρεί πρακτικά σταθερή την τάση των ακροδεκτών της γεννήτριας είτε την μεταβάλλει σύμφωνα με τις ανάγκες του Σ.Η.Ε. μέσω της κατάλληλης μεταβολής της τάσεως του τυλίγματος διεγέρσεως.

Η γεννήτρια είναι εφοδιασμένη με αυτόματο ρυθμιστή τάσεως ο οποίος βασίζεται στο μοντέλο ST1A της IEEE, βλέπε σχ. 3.8. Ο συγκεκριμένος τύπος χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει συστήματα στατικής διεγέρσεως όπου η ισχύς διεγέρσεως παρέχεται μέσω μετασχηματιστή από την έξοδο της γεννήτριας. Σε τέτοια συστήματα η διαθέσιμη, μέγιστη και ελάχιστη, τάση διεγέρσεως σχετίζεται προς την τάση ακροδεκτών της γεννήτριας ως εξής:

$$EFD_{\max} = V_t V_{r\max} - K_c IFD \quad (5-4)$$

$$EFD_{\min} = V_t V_{r\min} \quad (5-5)$$

όπου

EFD είναι η διαθέσιμη τιμή τάσεως του συστήματος διεγέρσεως,

V_t είναι η τιμή τάσεως των ακροδεκτών της γεννήτριας,

V_r είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας της τάσεως διεγέρσεως,

K_c είναι το κέρδος του περιοριστή και

IFD είναι η διαθέσιμη τιμή εντάσεως του συστήματος διεγέρσεως.

Ωστόσο σε περίπτωση όπου η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας υπερβαίνει την ονομαστική, η τάση διεγέρσεως δεν θα πρέπει να κινηθεί εκτός της $[V_{r\min} : V_{r\max}]$. Συχνά απαιτείται η υιοθέτηση περιοριστή της εντάσεως διεγέρσεως για την προστασία του τυλίγματος διεγέρσεως της γεννήτριας, δυνατότητα η οποία είναι πραγματοποιήσιμη με το συγκεκριμένο τύπο ρυθμιστή. Η οριακή τιμή ενάρξεως περιορισμού ορίζεται από το I_{LR} (Ilr στο MODELS) με το οποίο συγκρίνεται η τρέχουσα τιμή της εντάσεως διεγέρσεως IFD (IFD_{pu} στο MODELS). Εάν είναι επιθυμητή η ακύρωση αυτού του περιοριστή τότε το κέρδος K_{LR} τίθεται ίσο προς το μηδέν.

Σύμφωνα με το σχ. 5.4, σε κάθε χρονική στιγμή στην είσοδο του ρυθμιστή συγκρίνεται το επιθυμητό μέγεθος της τάσεως ακροδεκτών με το άθροισμα της εξόδου του μορφοτροπέα της τάσεως ακροδεκτών της γεννήτριας και του σήματος εξόδου του σταθεροποιητή ισχύος, ήτοι:

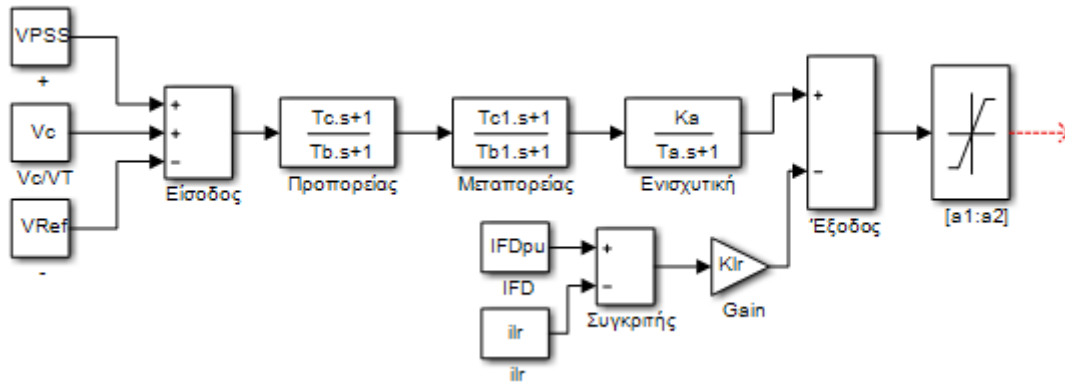
$$V_{PSS} + V_c - V_{Ref}$$

όπου

V_{PSS} είναι το σήμα εξόδου του σταθεροποιητή ισχύος,

V_c είναι η έξοδος του μορφοτροπέα της τάσεως ακροδεκτών της γεννήτριας και των στοιχείων αντισταθμίσεως, ίση με $V_t/(1 + sT_R)$, όπου T_R η σταθερά χρόνου του μορφο-τροπέα, και

V_{Ref} είναι η επιθυμητή τάση ακροδεκτών της γεννήτριας ή απλώς τάση αναφοράς.



Σχήμα 5.4: Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος ελέγχου ρυθμιστή τάσεως MODEL
EX_ST1A

Η έξοδος του αθροιστή αποτελεί την είσοδο των βαθμίδων προ & μεταπορείας και της ενισχυτικής βαθμίδας κέρδους K_A . Στην περίπτωση μας δεν χρησιμοποιείται ο βρόγχος ανατροφοδοτήσεως ($K_F = 0$), ούτε ο περιοριστής της εντάσεως διεγέρσεως ($K_{LR} = 0$). Εν τέλει παρέχεται περιοριστής της τάσεως διεγέρσεως εντός της $[V_t V_{rmin} : V_t V_{rmax}]$. Οι οριακές τιμές εξαρτώνται από την υπάρχουσα τάση ακροδεκτών, για να προσομοιωθεί το γεγονός ότι η μείωση της τάσεως ακροδεκτών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της τάσεως διεγέρσεως. Προφανώς, σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, για τριφασικό σφάλμα στους ακροδέκτες της γεννήτριας, ο μηδενισμός της τάσεως ακροδεκτών της γεννήτριας επιφέρει και κατάρρευση της τάσεως διεγέρσεως.

Ο ρυθμιστής τάσεως προσομοιώθηκε στο πρόγραμμα EMTP/ATP μέσω του υποπρογράμματος MODELS. Το σχετικό πρόγραμμα σε γλώσσα MODELS είναι το ακόλουθο:

```
MODEL EX_ST1A
DATA Vref,VTpu,Tr,Tc,Tb,Ka,Ta,Vuel,Voel, Klr, Ilr, Kf, Tf, VRmax,VRmin, Kc,
IFDref,Tc1,Tb1
```

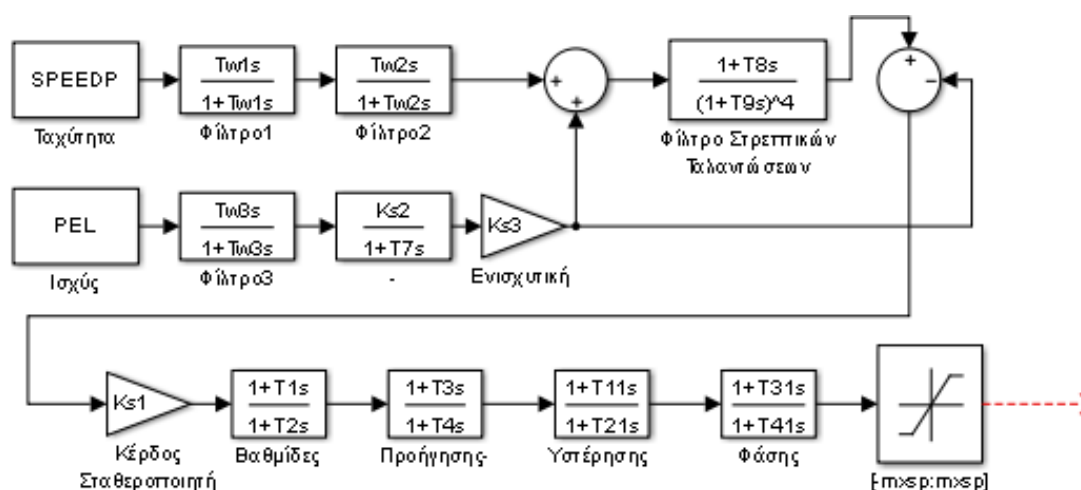
```

-- following variables are input by another MODEL or ATP (MODELS PRIMER, p. 23)
-- d- and q-axis generator voltage and PSS output (not existing)
INPUT VD, VQ, Vs
OUTPUT EFD
--all variables used in the MODEL group except those declared under INPUT, DATA
--& CONST (PRIMER p. 7)
VAR x1,x2,x21,x3,x4,x5,x6,EFD,Vc,VT,IFDpu,Efd0,a1,a2
HISTORY
  x1 {dflt:0},x2 {dflt:1/Ka},x21 {dflt:1/Ka},x3 {dflt:1.0},x4 {dflt:1.0},
  x5 {dflt:1.0},x6 {dflt:0},Vc {dflt: 1.0428095}
INIT
  EFD:=1.0
ENDINIT
EXEC
  Efd0:=1.
  IFDpu:=-1.0
  VT := SQRT(VD*VD+VQ*VQ)
  cLaplace(Vc/VT):=((1/VTpu)|s0)/(1|s0+Tr|s1)
  cLaplace(x6/x5):=(Kf|s1)/(1|s0+Tf|s1)
  x1:=Vref-Vc+Vs-x6
  cLaplace(x2/x1):=(1|s0+Tc|s1)/(1|s0+Tb|s1)
  cLaplace(x21/x2):=(1|s0+Tc1|s1)/(1|s0+Tb1|s1)
  cLaplace(x3/x2):=(Ka|s0)/(1|s0+Ta|s1)
  x4:=x3-(IFDpu-Ilr)*Klr
  x5:=max(x4,Vuel)
  x5:=min(x5,Voel)
  a1:= max((VT/VTpu)*VRmin, VRmin)
  a2:=min((VT/VTpu)*VRmax-Kc*IFDpu, VRmax)
  EFD:=x5 {min: a1 max: a2}
ENDEXEC
ENDMODEL
C -----

```

Ο σταθεροποιητής ισχύος (PSS) αποτελεί ένα κύκλωμα ενισχύσεως το οποίο έχει ως στόχο τη παροχή μίας πρόσθετης συνιστώσας ροπής αποσβέσεως στο σύστημα, μέσω της ελεγχόμενης διεγέρσεως. Το σύστημα διεγέρσεως είναι εφοδιασμένο με σταθεροποιητή ισχύος ο οποίος βασίζεται στο μοντέλο PSS2B της

IEEE, βλέπε σχ. 3.9. Χρησιμοποιεί δύο εισόδους, την ενεργό ισχύ και τη συχνότητα. Ανήκει στη κατηγορία των Σταθεροποιητών επιταχύνουσας ισχύος, ήτοι στην έξοδο του β' αθροιστή εμφανίζεται το ολοκλήρωμα ή μάλλον η 'εικόνα' της επιταχύνουσας ισχύος, το οποίο εν συνεχεία εισάγεται στο κλάδο σταθεροποίησης και στον περιοριστή σήματος εξόδου.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα βαθμίδων συστήματος ελέγχου σταθεροποιητή ισχύος

MODEL PSS2B

Το σχετικό πρόγραμμα σε γλώσσα MODELS είναι το ακόλουθο:

```
C -----
MODEL PSS2B
DATA Tw1,Tw2,Tw3,ks2,T7,ks3,T8,T9,ks1,T1,T2,T3,T4,T11,T21,T31,T41,mxsp
-- following variables are input from TACS/MODELS or from ATP program:
-- gen. angular velocity (deviation from synchronous!) and electrical torque
INPUT teg, speed
OUTPUT vspss
VAR y1,y2,y3,y4,y51,y52,y53,y54,y6,y7,y8,y9,y10,Smech,PEL,vspss,SPEEDP,PELO
HISTORY
y1 {dflt:0},y2 {dflt:0},y3 {dflt:0},y4 {dflt:0},Smech {dflt:0},y51 {dflt:0},
y52 {dflt:0},y53 {dflt:0},y54 {dflt:0},y7 {dflt:0},y8 {dflt:0},y9 {dflt:0},
y10 {dflt:0},PEL {dflt:0}
INIT
vspss:= 0.0
ENDINIT
```

```

EXEC
if T<1*timestep then --Special trick to obtain the initial PELO
    PEL0:=speed*teg
else

endif

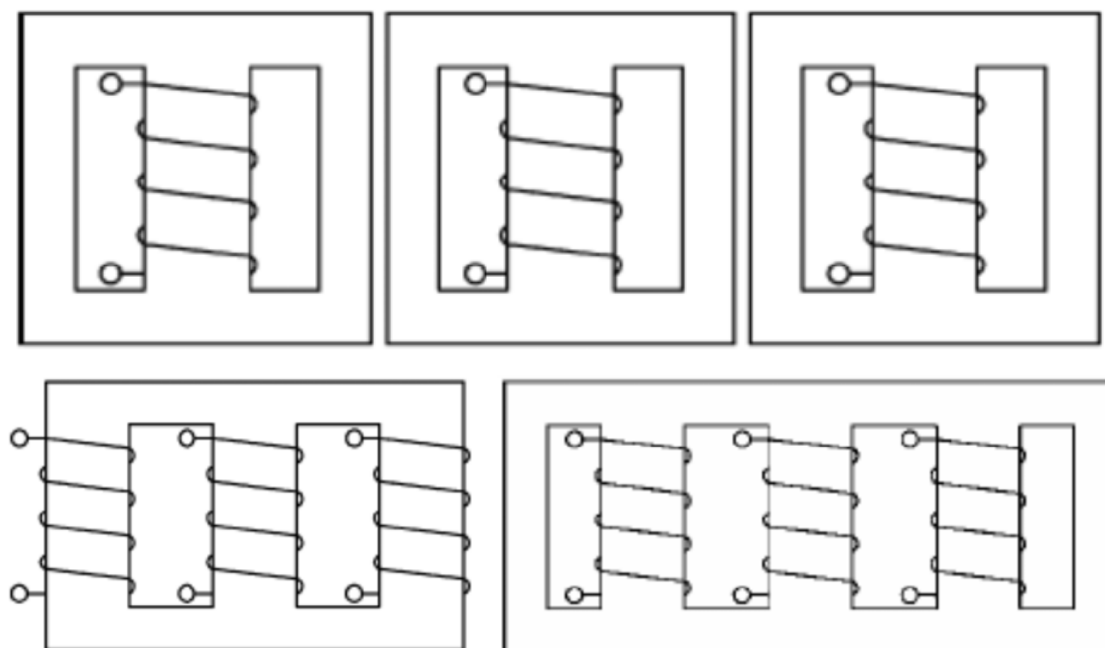
    SPEEDP:= speed/314.159654
-- steady state MW (here 425.6 MW) has been found as PELO .....
    PEL:=speed*teg/PELO
    cLaplace(y1/SPEEDP):=(Tw1|s1)/(1|s0+Tw1|s1)
    cLaplace(y2/y1):=(Tw2|s1)/(1|s0+Tw2|s1)
    cLaplace(y3/PEL):=(Tw3|s1)/(1|s0+Tw3|s1)
    cLaplace(y4/y3):=(ks2|s0)/(1|s0+T7|s1)
    Smech:=y2+ks3*y4
    cLaplace(y51/Smech):=(1|s0+T8|s1)/(1|s0+T9|s1)
    cLaplace(y52/y51):=(1|s0)/(1|s0+T9|s1)
    cLaplace(y53/y52):=(1|s0)/(1|s0+T9|s1)
    cLaplace(y54/y53):=(1|s0)/(1|s0+T9|s1)
    y6:=y54-y4
    cLaplace(y7/y6):=(ks1|s0+ks1*T1|s1)/(1|s0+T2|s1)
    cLaplace(y8/y7):=(1|s0+T3|s1)/(1|s0+T4|s1)
    cLaplace(y9/y8):=(1|s0+T11|s1)/(1|s0+T21|s1)
    cLaplace(y10/y9):=(1|s0+T31|s1)/(1|s0+T41|s1)
    VsPSS:=y10 {min:-mxsp max:mxsp}
ENDEXEC
ENDMODEL
C -----

```

5.6 Προσομοίωση Μ/Σ μονάδος

Από τα δεδομένα κατασκευαστή του Μ/Σ, βλέπε Πίνακα 4, προκύπτει ότι αυτός είναι πεντασκελής τύπου πυρήνα και συνδεσμολογίας YNd1. Σύμφωνα με τα [23] & [27] στους πεντασκελείς τριφασικούς Μ/Σ τύπου πυρήνα παρέχεται οδός για την μαγνητική ροή μηδενικής ακολουθίας μέσω του σιδηροπυρήνα. Ως εκ τούτου αυτοί μπορούν να προσομοιωθούν με τη βοήθεια τριών όμοιων μονοφασικών Μ/Σ. Για την προσομοίωση του Μ/Σ μονάδος μέσω του EMTP/ATP, επιλέγεται η μονάδα 'SATURABLE TRANSFORMER'. Μέσω αυτής μπορούμε να προσομοιώσουμε τη μη

γραμμική συμπεριφορά του κλάδου μαγνητίσεως με εξαγωγή της καμπύλης μαγνητίσεως υπο την μορφή ζευγών τιμών κορυφής ροής, $\lambda_{\max}$, και εντάσεως, $I_{\max}$.



Σχήμα 5.6: Τριφασικοί Μ/Σ τριπλού πυρήνα (3 Μονοφασικοί), (α), τρισκελείς τύπου πυρήνα, (β), και πεντασκελείς τύπου πυρήνα, (γ)

Η εξαγωγή της καμπύλης μαγνητίσεως βασίζεται στην γνώση των ζευγών τάσεως διέγερσης, V_{rms} , και έντασης, I_{rms} , της εργοστασιακής δοκιμής διεγέρσεως του Μ/Σ. Τα αποτελέσματα αυτής δόθηκαν από το κατασκευαστή και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1 - Αποτελέσματα δοκιμής διεγέρσεως Μ/Σ μονάδος

Μέτρηση του ρεύματος μαγνητίσεως και απωλειών εν κενώ

Φασική τιμή Τάσης τροφοδοσίας			Ρεύμα μαγνητίσεως (A)					Απώλειες μαγνητίσεως	
			Φασική			Μέση Τιμή		(W)	
%	Μέση Τιμή (V)	Ενεργός Τιμή r.m.s. (V)	Ia	Ib	Ic	Io	%	Pm	Po
90	10912	10896	5,52	3,93	5,08	4,843	0,035	145318	145531
100	12124	12104	6,69	4,71	5,54	5,647	0,041	190078	190392
105	12731	12702	8,11	6,24	6,42	6,923	0,050	222507	223015
110	13337	13288	13,93	12,82	11,75	12,833	0,093	269726	270721

Εάν αμελήσουμε τις αρμονικές, οι οποίες προκαλούνται από τη μη ημιτονοειδή μορφή του ρεύματος μαγνητίσεως, η ενεργός τιμή εντάσεως διεγέρσεως σε συνδεσμολογία τριγώνου ισούται με:

$$I_{ex,\Delta} = I_{ex}/\sqrt{3} \quad (5-6)$$

ενώ η ενεργός τιμή εντάσεως μαγνητίσεως υπολογίζεται ως εξής:

$$I_{m,\Delta} \approx \sqrt{I_{ex,\Delta}^2 - (P_{ex}/3V_{ex})^2} \quad (5-7)$$

όπου

I_{ex} είναι η τιμή εντάσεως διεγέρσεως ανα φάση,

I_m είναι η τιμή εντάσεως μαγνητίσεως ανα φάση,

P_{ex} είναι οι απώλειες διεγέρσεως και

V_{ex} είναι η τάση διεγέρσεως.

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.1 και τις εξ. 5-4 & 5-5 υπολογίζουμε τα ζεύγη τιμών (V_{rms} , I_{rms}), βλέπε Πίνακα 5.2:

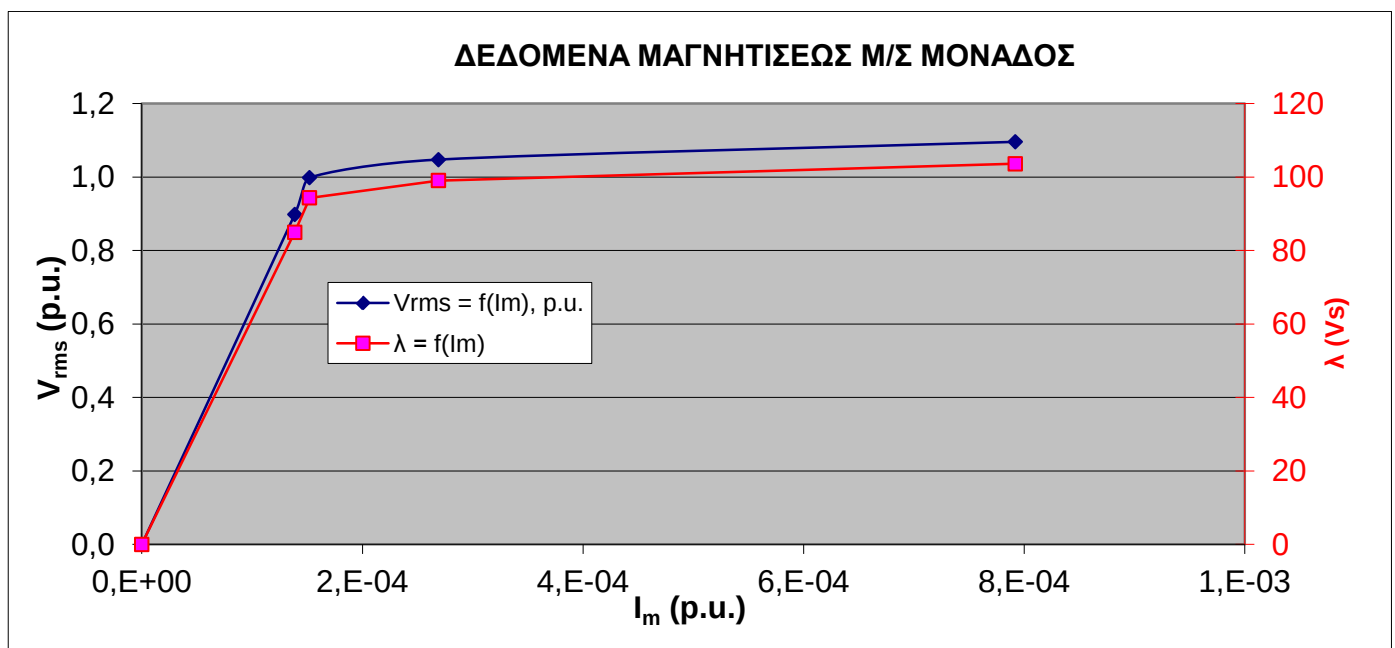
Πίνακας 5.2 - Ζεύγη τιμών διεγέρσεως (V_{rms} , I_{rms}) M/Σ μονάδος

Υπολογισμός σύμφωνα με το παράδειγμα XIX-G-3.3 του ATP RuleBook για $S_T = 500 \text{ MVA}$, $V_T = 21 \text{ kV}$, $I_{T,\Delta} = I_T/\sqrt{3} = S/3V = 7936.5 \text{ A}$			
$I_{ex,\Delta}$	$I_{m,\Delta}$	$V_{rms} \text{ (p.u.)}$	$I_{rms} \text{ (p.u.)}$
A		—	
2,796	1,101	0,899	0,00014
3,260	1,210	0,998	0,00015
3,997	2,135	1,048	0,00027
7,409	6,287	1,096	0,00079

Εν συνεχεία η μετρηθείσα καμπύλη (V_{rms} , I_{rms}) εισάγεται ως δεδομένο στο ΕΜΤΡ/ΑΤΡ, όπου μετατρέπεται στην ζητούμενη καμπύλη (λ_{max} , I_{max}) μέσω του υποπρογράμματος SATURA, βλέπε Πίνακα 5.3 & σχ. 5.7:

Πίνακας 5.3 - Ζεύγη τιμών διεγέρσεως (λ_{max} , I_{max}) και συνιστώσες κλάδου μαγνητίσεως M/Σ μονάδος, ανηγμένες στο τύλιγμα Χ.Τ.

Υπολογισμός υπορουτίνας SATURA		Ωμική και επαγωγική συνιστώσα κλάδου μαγνητίσεως (Δ)	
I (A)	λ (Vs)	$R_{mag,\Delta}(\Omega)$	$X_{mag,\Delta}(\Omega)$
0,00000	0,00000	—	—
1,55613	84,95699	7342	17142
1,68108	94,37250	6926	17324
5,33428	99,03299	6511	10302
17,68480	103,60840	5870	3661



Σχήμα 5.7: Καμπύλη Μαγνητίσεως Μ/Σ μονάδος

Όσον αφορά στους πεντασκελείς τριφασικούς Μ/Σ τύπου πυρήνος, η μονάδα ‘SATURABLE TRANSFORMER’ θεωρεί ότι τα τυλίγματα των τριών φάσεων δεν είναι μαγνητικά συζευγμένα μεταξύ τους αλλά ούτε και με το κλάδο μαγνητίσεως. Οι χωρητικότητες αμελούνται, γεγονός που καθιστά το μοντέλο έγκυρο για μελέτες μεταβατικών φαινομένων μικρής διάρκειας και συχνότητας μικρότερης των 5 kHz^{5.3}. Επίσης θεωρεί τις παραμέτρους της μηδενικής ακολουθίας όμοιες με της θετικής,

ήτοι η καμπύλη μαγνητίσεως είναι η ίδια για το σύνολο των σκελών. Οι απώλειες πυρήνα περιορίζονται σε μία ωμική αντίσταση, R_{mag} , βλέπε Πίνακα 5.3, συνδεδεμένη παράλληλα στο κλάδο μαγνητίσεως.

Οι τιμές των αυτεπαγωγών σκεδάσεως και των ωμικών αντιστάσεων των τυλιγμάτων υπολογίζονται ξεχωριστά, με την βοήθεια των αποτελεσμάτων της εργοστασιακής δοκιμής βραχυκυκλώσεως του Μ/Σ. Αρχικά υπολογίζεται η ωμική συνιστώσα βραχυκυκλώσεως, η οποία στη συνέχεια διαιρείται ισομερώς στις ωμικές αντιστάσεις των δύο τυλιγμάτων:

$$R_{sc} = P_{sc, loss} / 3I_{sc}^2 \quad (5-8)$$

$$R_1 = \frac{R_{sc}}{2} \frac{1}{t_r^2}, R_2 = \frac{R_{sc}}{2} \quad (5-9)$$

Η εξ. 5-9 εξάγει λογικά αποτελέσματα αν και συμπεριλαμβάνει τις απώλειες πυρήνος μαζί με τις απώλειες χαλκού. Εν συνεχεία υπολογίζουμε τις αυτεπαγωγές σκεδάσεως ακολουθώντας την ίδια συλλογιστική πορεία:

$$X_{sc} = \frac{1}{I_{sc}} \sqrt{(U_{sc}^2 - (P_{sc, loss} / 3I_{sc}^2)^2)} \quad (5-10)$$

$$X_1 = \frac{X_{sc}}{2} \frac{1}{t_r^2}, X_2 = \frac{X_{sc}}{2} \quad (5-11)$$

Η ως άνω αντίδραση X_1 και η ωμική αντίσταση R_1 υπολογίζονται στο τύλιγμα Μ.Τ. του Μ/Σ μονάδος και είναι οι τιμές ανα φάση σε συνδεσμολογία αστέρα. Στην περίπτωση μας, όμως, κατά την οποία το τύλιγμα Μ.Τ. έχει συνδεσμολογία τριγώνου (παραπάνω αναφέρεται και ως 'Δ'), η ισοδύναμη σύνθετη αντίσταση του τυλίγματος Μ.Τ. ευρίσκεται μέσω του θεωρήματος Kennelly ίση με:

$$R_{1,\Delta} = 3R_1 = 3 \frac{R_{sc}}{2} \frac{1}{t_r^2} \quad (5-12)$$

$$X_{1,\Delta} = 3X_1 = 3 \frac{X_{sc}}{2} \frac{1}{t_r^2} \quad (5-13)$$

Η προσομοίωση του Μ/Σ Μονάδος στο ATP/EMTP γίνεται ως ακολούθως:

```
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>
```

```
TRANSFORMER      1.674494.344  T1 6924.
```

```
1.5567604238  84.985358664
```

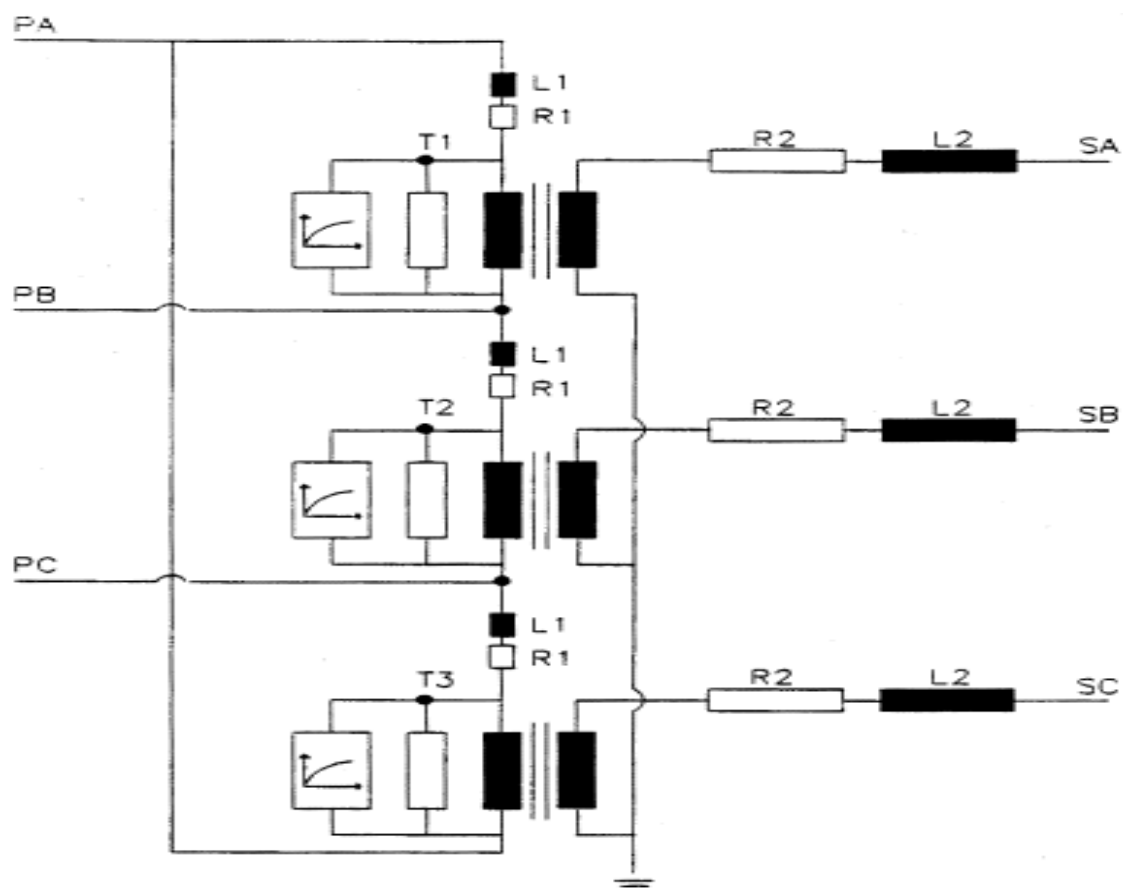
```
1.6743562369  94.34414677
```

```
5.3206780998  99.07080743
```

```

17.736906264 103.60840166
9999
1GENTEAGENTEB 2.7E-3.24235 2.1E4
2TRANSANEUTRA .3313330.04623.4E4
TRANSFORMER T1 T2
1GENTEBGENTEC
2TRANSBNEUTRA
TRANSFORMER T1 T3
1GENTECGENTEA
2TRANSCNEUTRA
C CCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCCC

```



Σχήμα 5.8: Ισοδύναμο κύκλωμα Μ/Σ μονάδος σύμφωνα με τη μονάδα 'SATURABLE TRANSFORMER' του EMTP/ATP^{5.4}

5.7 Προσομοίωση Μ/Σ βοηθητικών μονάδος

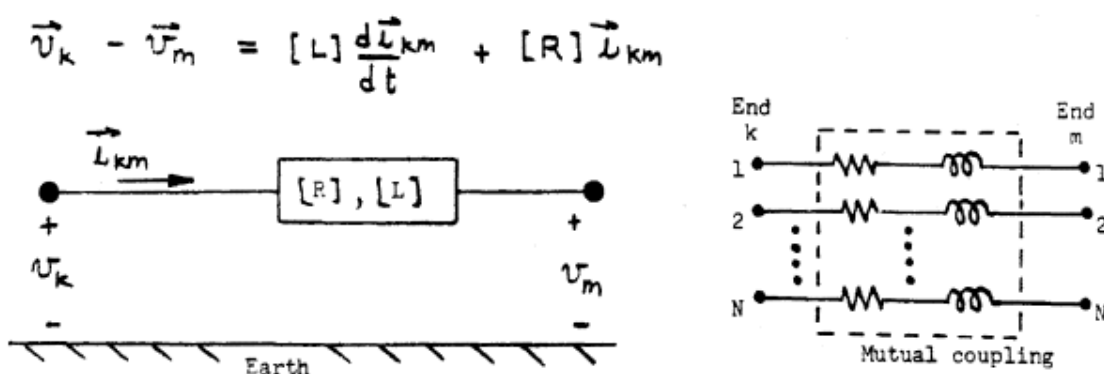
Ο Μ/Σ είναι τριών τυλιγμάτων, τριφασικός, τρισκελής τύπου πυρήνα επομένως για την προσομοίωση του θα χρησιμοποιήσουμε το βοηθητικό υποπρόγραμμα BCTRAN του EMTP/ATP. Το BCTRAN προσομοιώνει τον Μ/Σ με την βοήθεια αμοιβαία συζευγμένων κλάδων σύμφωνα με την εξ. 5-14, βλέπε σχ. 5.9:

$$\underline{U}_k - \underline{U}_m = \underline{L} \frac{di_{km}}{dt} + \underline{R} i_{km} \quad (5-14)$$

ή

$$\frac{di_{km}}{dt} = \underline{A}(\underline{U}_k - \underline{U}_m) - \underline{L}^{-1} \underline{R} i_{km} = \underline{A}(\underline{U}_k - \underline{U}_m) - \underline{AB} i_{km} \quad (5-15)$$

όπου $\underline{A}$ ο αντίστροφος του πίνακα των επαγωγών.



Σχήμα 5.9: Αναπαράσταση n αμοιβαία συζευγμένων κλάδων R-L^{5.4}

Από την παραπάνω εξίσωση καθίσταται προφανές ότι η ωμική και η επαγωγική συνιστώσα της σύνθετης αντιστάσεως του Μ/Σ διαχωρίζονται, γεγονός που αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση όσον αφορά τη μελέτη μεταβατικών φαινομένων.

Στην περίπτωση μας οι κλάδοι k και m είναι οι ακόλουθοι:

GENTEA-N, GENTEB-N & GENTEC-N (φάσεις A, B, C γεννήτριας), LV6_3A-N1, LV6_3B-N1 & LV6_3C-N1 (φάσεις A, B, C τυλιγμάτων 6.3 kV Μ/Σ βοηθητικών μονάδος) και LV5_6A-N2, LV5_6B-N2 & LV5_6C-N2 (φάσεις A, B, C τυλιγμάτων 5.6 kV βοηθητικών μονάδος) όπου N, N1 & N2 οι κόμβοι ουδετέρου του τυλίγματος 21 kV, 6.3 kV & 5.6 kV αντιστοίχως.

Προκειμένου να υπολογισθούν οι μήτρες $[R]$ & $[L]$ των εξισώσεων του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος απαιτείται, πέραν των άλλων, η διεξαγωγή δοκιμής

διεγέρσεως, θετικής και μηδενικής ακολουθίας, στο πλησιέστερο τύλιγμα στο σιδηροπυρήνα του Μ/Σ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δοκιμή διεγέρσεως μηδενικής ακολουθίας σε τριφασικό Μ/Σ, πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής ονομαστικής φασικής τάσεως μεταξύ των βραχυκυκλωμένων φάσεων του τυλίγματος υπο μέτρηση και του ουδετέρου ή της γής. Στην περίπτωση μας διαθέτουμε δεδομένα δοκιμής διεγέρσεως θετικής ακολουθίας στο τύλιγμα των 5.6 kV, ενώ η μέτρηση της αντίδρασης μηδενικής ακολουθίας διεξήχθη στο τύλιγμα των 21 kV. Η απουσία εξωτερικού κόμβου ουδετέρου στο τύλιγμα των 5.6 kV (y_0) είχε ως αποτέλεσμα την διεξαγωγή των δύο παραπάνω έλεγχων σε διαφορετικά τυλίγματα. Ως εκ τούτου τα δεδομένα της δοκιμής διεγέρσεως μηδενικής ακολουθίας θεωρούνται ελλιπείς και δεν θα εισαχθούν στην υπορουτίνα BCTAN.

Επιπρόσθετα απαιτείται η διεξαγωγή δοκιμών βραχυκυκλώσεως θετικής και μηδενικής ακολουθίας. Όσον αφορά τη σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώσεως μηδενικής ακολουθίας, ο κατασκευαστής πραγματοποίησε τη δοκιμή στο τύλιγμα των 21 kV, χωρίς να αναφέρει εάν κάποιο άλλο τύλιγμα διατηρήθηκε ανοιχτοκυκλωμένο ή βραχυκυκλώθηκε. Εντούτοις, σύμφωνα με το [29], για το συγκεκριμένο έλεγχο δίδεται η δυνατότητα τα άλλα τυλίγματα να είναι είτε ανοιχτοκυκλωμένα ή βραχυκυκλωμένα. Άλλωστε η παραπάνω δοκιμή δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί στα τυλίγματα των 5.6 kV ή των 6.3 kV λόγω απουσίας εξωτερικού κόμβου ουδετέρου. Ως εκ τούτου θεωρούμε ότι οι δοκιμές 2-3 & 3-1 είχαν απώλειες κατ' αναλογία άλλων πρακτικών περιπτώσεων. Τα δεδομένα βραχυκυκλώσεως θετικής ακολουθίας δόθηκαν από τον κατασκευαστή, βλέπε Πίνακα 5. Το πρόγραμμα υπολογισμού των μητρών του Μ/Σ βοηθητικών μονάδος είναι το εξής:

```
BEGIN NEW DATA CASE
ACCESS MODULE BCTAN
$ERASE
C excitation test data card.....
C the 5.6 kV winding is the closest to the core, so IW = 3 the ref nr of the
C winding where magnetizing branch is to be placed.....
C IT is the ref nr of the winding from where the excitation test was made.....
C IP is the output request flag: 0/blank-> A & B, >0-> R & wL, <0 -> both A, B &
C R, wL. Note that A = inverse of L & B = AxR
C p.s.exc. test at 5.6 kV side.....><z.s. exc. test at 21 kV side>
C < FREQ >< IEXPOS >< SPOS >< LEXPOS >< IEXZERO >< SZERO >< LEXZERO >NPITIWIP
3 50. .06 36. 17. 0 1 3-1
C Winding data cards >< >< ><
```

```

C >> VRAT >> R >>> PHASE1 >> PHASE2 >> PHASE3 >
1 12.124356 .026302 GENTEA GENTEB GENTEC
2 3.6373067 .007735 LV6_3AN1 LV6_3BN1 LV6_3CN1
3 3.2331615 .0032487 LV5_6AN2 LV5_6BN2 LV5_6CN2
C Short-circuit test data cards IDIL
C <<< PIJ >> ZPOSIJ >> SPOS >> ZZEROIJ >> SZERO ><<<
1 2 62.875 7.44 15.8 115.9 36.0 0 1
2 3 107.086 17.50 15.8 270. 15.8 0 1
3 1 66.489 8.64 20.2 135. 20.2 0 1
BLANK card ending short-circuit test data
$PUNCH
BLANK card ending BCTRAN data
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK CARD

```

Η μήτρα $\underline{R}$ (Ω) είναι:

	GENTEA N	LV6_3A N1	LV5_6A N2	GENTEB N	LV6_3B N1	LV5_6B N2	GENTEC N	LV6_3C N1	LV5_6C N2
GENTEA N	0,000000								
LV6_3A N1	0,010277								
LV5_6A N2		0,005332							
GENTEB N				0,000000					
LV6_3B N1				0,010277					
LV5_6B N2					0,005332				
GENTEC N							0,000000		
LV6_3C N1							0,010277		
LV5_6C N2								0,005332	

Η μήτρα $\omega \underline{L}$ (Ω), για συχνότητα $f = 50$ Hz, είναι:

	GENTEA N	LV6_3A N1	LV5_6A N2	GENTEB N	LV6_3B N1	LV5_6B N2	GENTEC N	LV6_3C N1	LV5_6C N2
GENTEA N	22070								
LV6_3A N1	6924	2169							
LV5_6A N2	3944	1183	1052						
GENTEB N	-11028	-3005	-4881	22070					
LV6_3B N1	-3005	-810	-1464	6924	2169				
LV5_6B N2	-4881	-1464	-1302	3944	1183	1052			
GENTEC N	-11028	-3005	-4881	-11028	-3005	-4881	22070		
LV6_3C N1	-3005	-810	-1464	-3005	-810	-1464	6924	2169	
LV5_6C N2	-4881	-1464	-1302	-4881	-1464	-1302	3944	1183	1052

Η μήτρα $\underline{A} = \underline{L}^{-1}$ (1/mH) είναι:

	GENTEA N	LV6_3A N1	LV5_6A N2	GENTEB N	LV6_3B N1	LV5_6B N2	GENTEC N	LV6_3C N1	LV5_6C N2
GENTEA N	276								
LV6_3A N1	-442	1184							
LV5_6A N2	-539	326	1653						
GENTEB N	-139	223	269	276					
LV6_3B N1	223	-596	-164	-442	1184				
LV5_6B N2	269	-164	-826	-539	326	1653			
GENTEC N	-139	226	269	-139	223	269	276		
LV6_3C N1	223	-596	-164	223	-596	-164	-442	1184	
LV5_6C N2	269	-164	-826	269	-164	-826	-539	326	1653

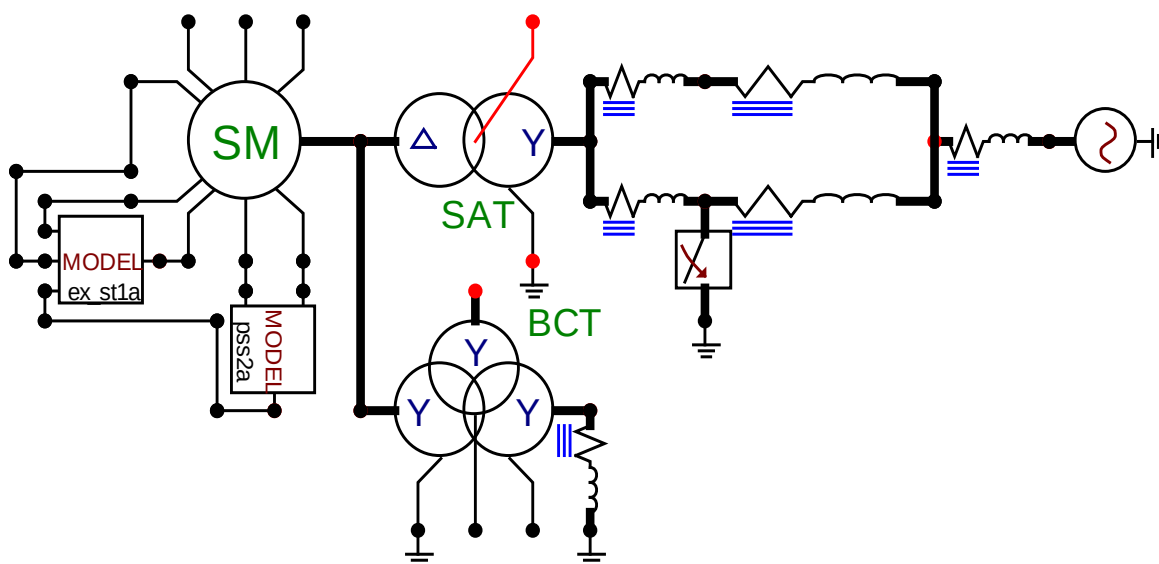
Όσον αφορά τις μήτρες $\underline{R}$, $\omega \underline{L}$ και $\underline{A}$ πρέπει να σημειωθεί ότι οι υποπίνακες ίδιας αποχρώσεως ταυτίζονται. Το τυχόν στοιχείο ij καθενός από τους παραπάνω πίνακες αφορά στην αμοιβαία παράμετρο μεταξύ τυλιγμάτων ij όπου $i,j = 1,...,9$ για τα τυλίγματα: GENTEA N, LV6_3A N1, LV5_6A N2, κ.ο.κ. Σημειώνεται επιπρόσθετα ότι οι πίνακες, καθώς και οι υποπίνακες, είναι συμμετρικοί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Αποτελέσματα Μεταβατικής Μελέτης & Σχολιασμός

6.1 Γενικά

Η μεταβατική μελέτη αναλύει την συμπεριφορά της γεννήτριας εν συνεχεία τριφασικού σφάλματος με γη στο πρώτο 10% του μήκους της μία εκ των δύο παράλληλων γραμμών μεταφοράς των 400 kV. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η τελική μορφή του κυκλώματος στον γραφικό προ-επεξεργαστή ATPDraw:

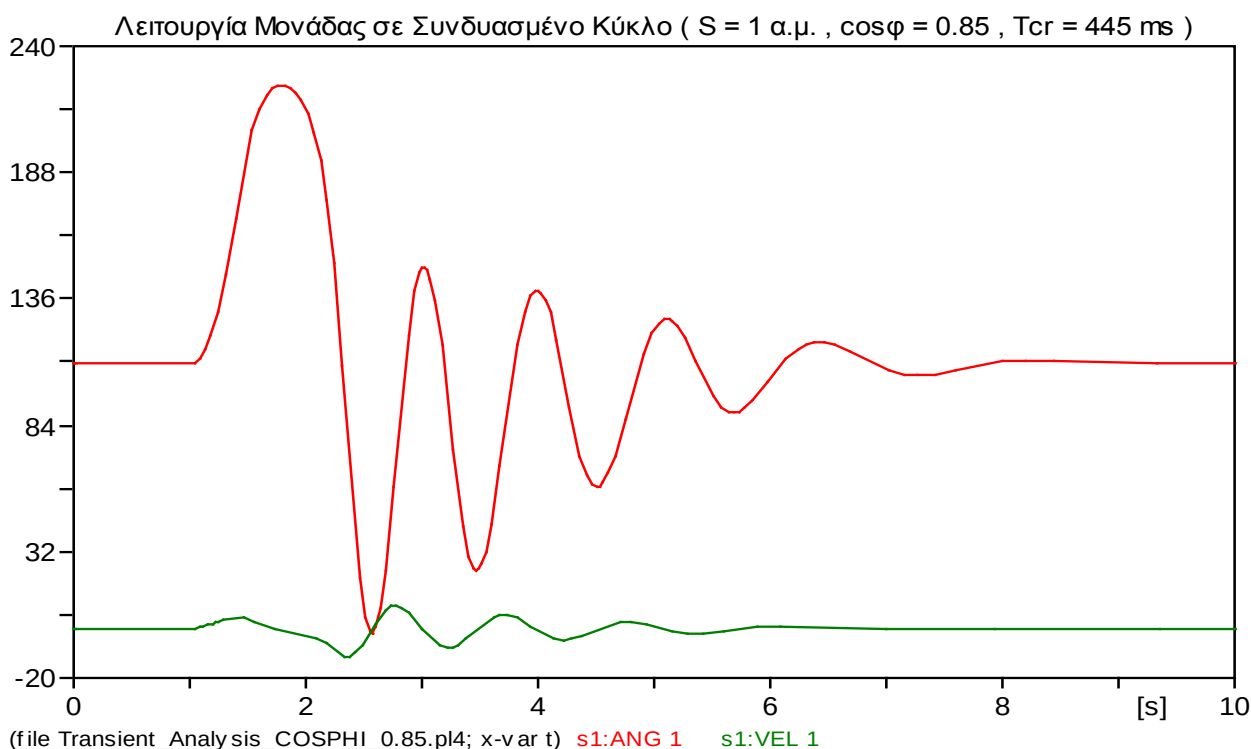


Σχήμα 6.1: Διάγραμμα Προσομοίωσης Σ.Η.Ε. στο ATPDraw

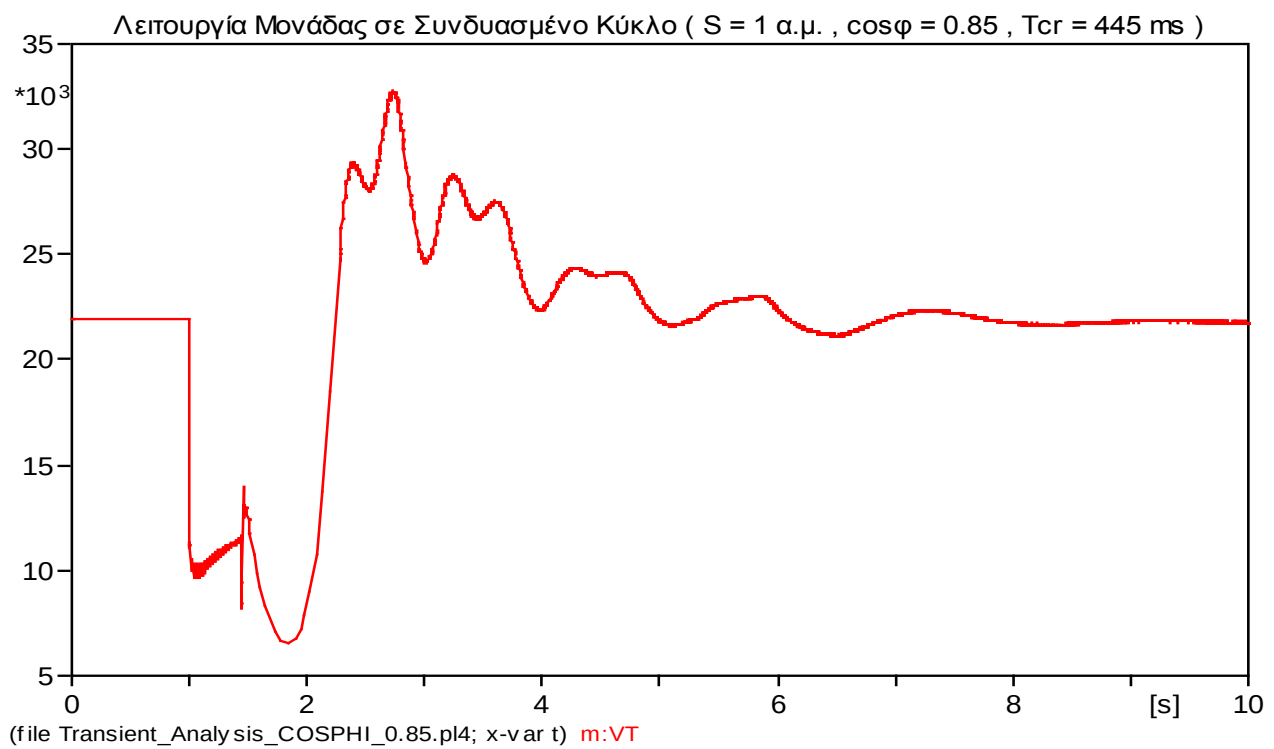
Η μεταβατική μελέτη διεξάγεται κατ' αρχήν με την γεννήτρια λειτουργούσα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, στη συνέχεια δε για διάφορες τιμές του συντελεστή ισχύος. Τέλος η μελέτη διεξάγεται και για την περίπτωση ανοιχτού κύκλου. Πριν την προσομοίωση της κάθε περίπτωσης, κρίνεται απαραίτητη η αρχικοποίηση των δεδομένων της γεννήτριας, του δικτύου των 400 kV και των συστημάτων ελέγχου. Η εύρεση του κρίσιμου χρόνου εκκαθάρισεως για την κάθε περίπτωση έγινε με τη μέθοδο 'της δοκιμής και του λάθους'.

6.2 Λειτουργία συνδυασμένου κύκλου

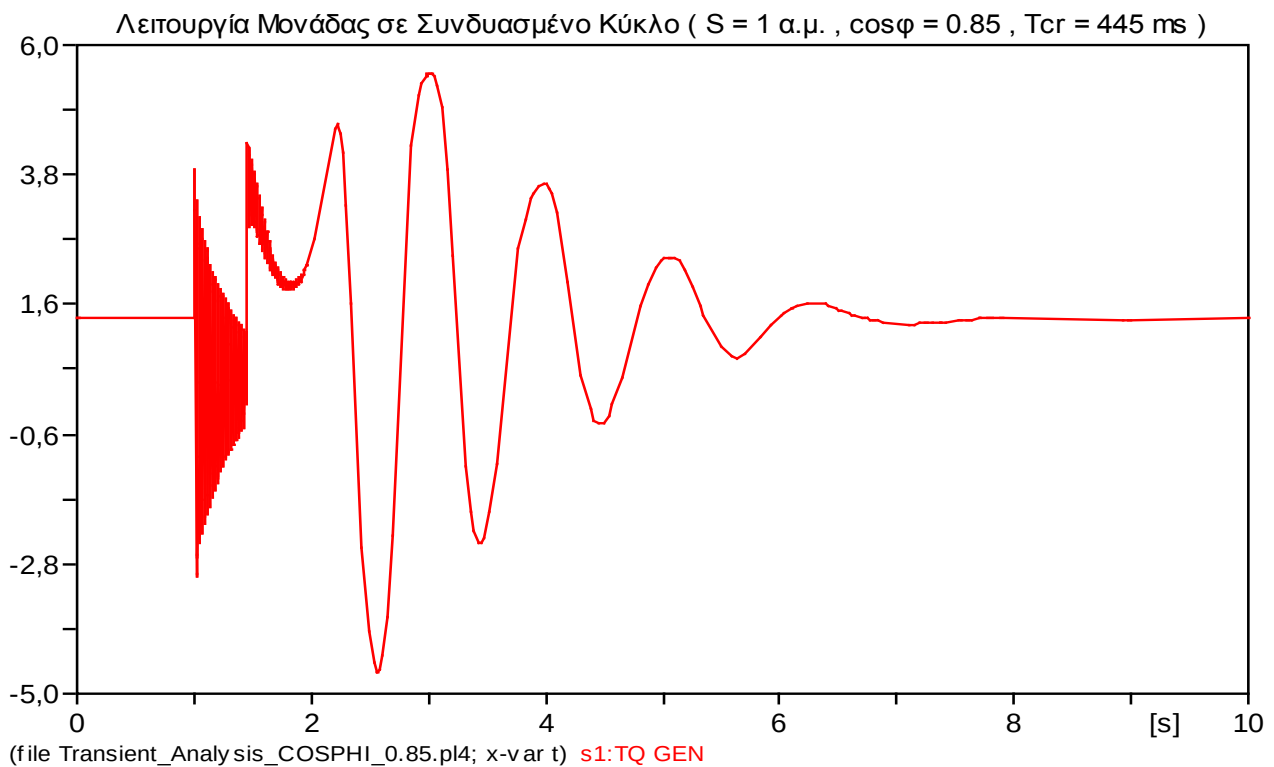
Η μεταβατική μελέτη δείχνει ότι η γεννήτρια στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, ήτοι υπο φορτίο 1 ανά μονάδα και συντελεστή ισχύος $\cos\varphi = 0.85$, μπορεί να αντέξει σφάλματα διάρκειας έως 445 ms, χωρίς να εμφανίσει ολίσθηση πόλων ή απώλεια συγχρονισμού. Στα σχ. 6.2, 6.3 & 6.4 φαίνεται η διακύμανση της ηλεκτρικής γωνίας και της ταχύτητας του στρεφόμενου συγκροτήματος καθώς και της τάσεως ακροδεκτών γεννήτριας και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής αυτής για την περίπτωση τριφασικού σφάλματος με χρόνο εκκαθαρίσεως τα 445 ms. Φαίνεται ότι το σύστημα είναι ευσταθές, η δε διακύμανση των εξεταζόμενων μεγεθών ακολουθεί την βασική συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλαντώσεως, η οποία για την περίπτωση που εξετάζουμε ισούται με $f \approx 0.978$ Hz. Η απόσβεση των ταλαντώσεων διαρκεί περίπου 7 με 8 περιόδους του ενός δευτερολέπτου. Στη συνέχεια η γεννήτρια επανέρχεται στη προσφαλματική μόνιμη κατάσταση λειτουργίας.



Σχήμα 6.2: Ηλεκτρική γωνία και ταχύτητα στρεφόμενου άξονα συναρτήσει του χρόνου

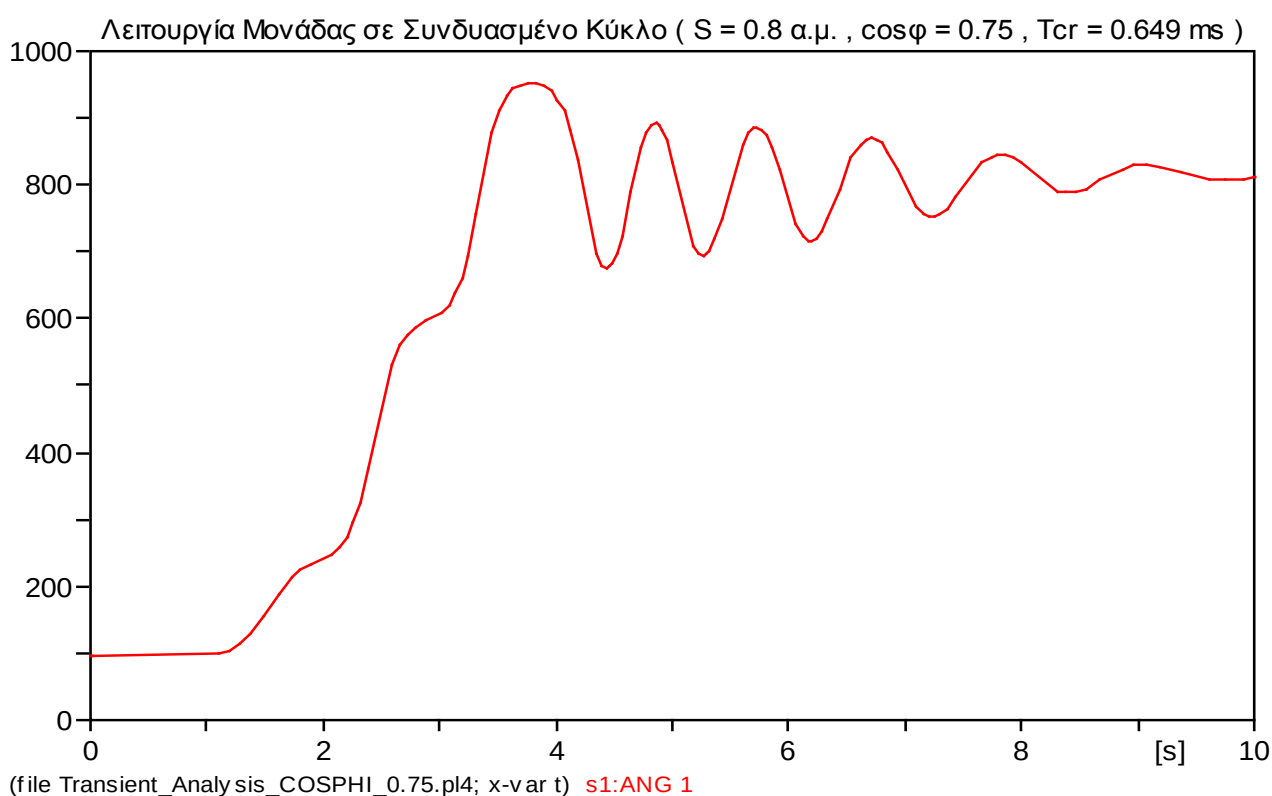


Σχήμα 6.3: Τάση ακροδεκτών γεννήτριας συναρτήσει του χρόνου

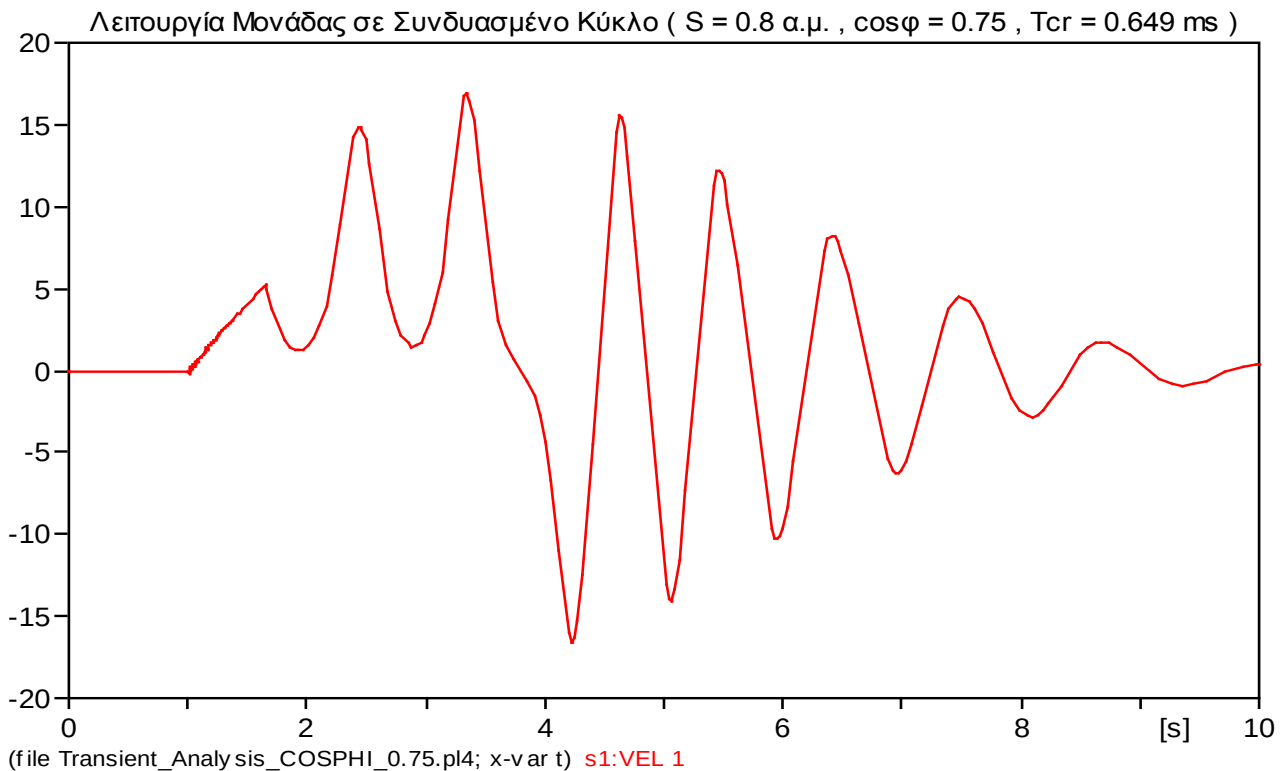


Σχήμα 6.4: Ηλεκτρομαγνητική ροπή γεννήτριας συναρτήσει του χρόνου

Στην συνέχεια μειώνουμε την παραγόμενη ενεργό ισχύ στα 300 MW, υπό σταθερή άεργο φόρτιση. Η γεννήτρια, λειτουργούσα σε κατάσταση υπερδιεγέρσεως, ήτοι υπό φορτίο 0.8 ανά μονάδα και συντελεστή ισχύος 0.75 επαγωγικό, παραμένει σε συγχρονισμό για σφάλματα διάρκειας έως και 649 ms, τουτέστιν για μεγαλύτερο κρίσιμο χρόνο εκκαθαρίσεως σφάλματος. Στα σχ. 6.5 & 6.6 φαίνεται η διακύμανση της ηλεκτρικής γωνίας και της ταχύτητος για την περίπτωση σφάλματος διάρκειας 0.649 ms. Από το διάγραμμα της γωνίας φαίνεται ότι η γεννήτρια εμφανίζει ολίσθηση πόλων κατά 4π (720°), επανερχόμενη όμως σε ευσταθή λειτουργία. Μέσω της διακύμανσης της ηλεκτρικής γωνίας του δρομέα της γεννήτριας, φαίνεται η προσπάθεια ανακτήσεως συγχρονισμού μετά το πέρας του σφάλματος, με τιμή γωνίας 220° , καθώς και μετά από κάθε ολίσθηση, με τιμές γωνίας 580° ($220^\circ + 2\pi$) και 940° ($220^\circ + 4\pi$) αντίστοιχα. Η ευστάθεια ανακτάται λόγω της μείωσης της ταχύτητος ολίσθησεως στο χρονικό διάστημα μεταξύ 3-4s.

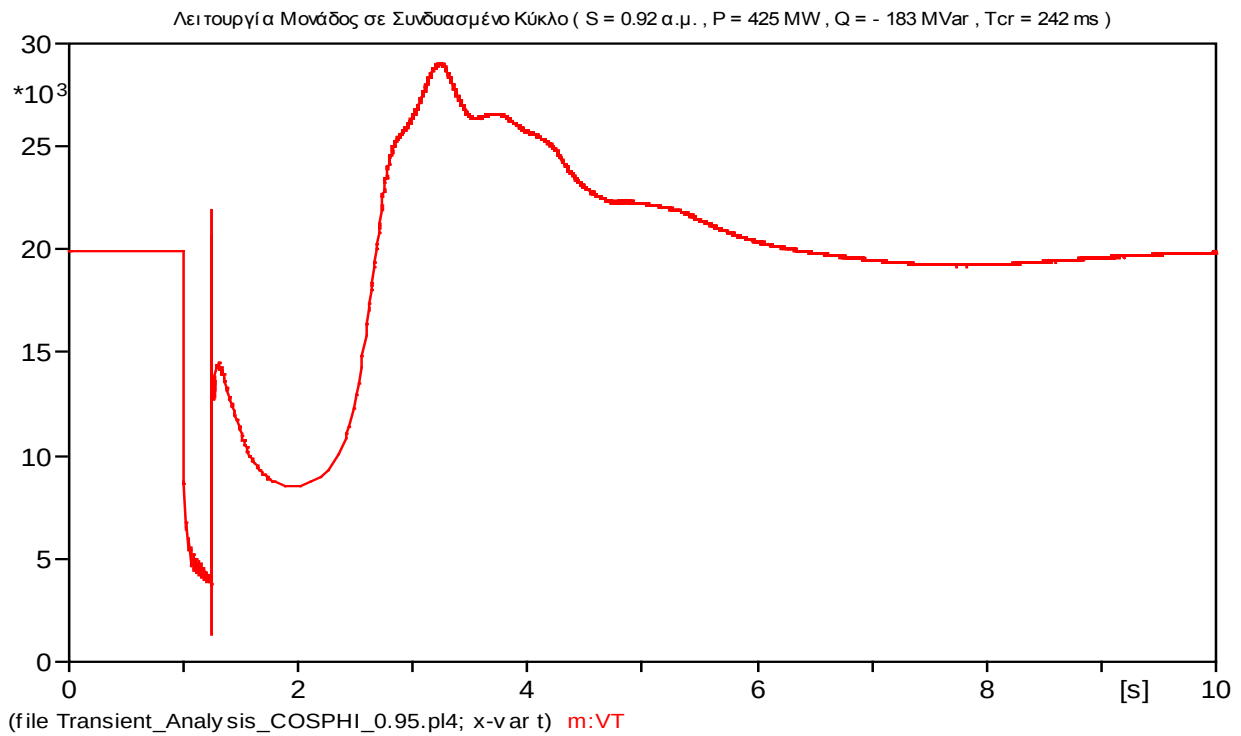


Σχήμα 6.5: Ηλεκτρική γωνία συναρτήσει του χρόνου (ολίσθηση πόλων εν συνεχεία τριφασικού βραχυκυκλώματος)

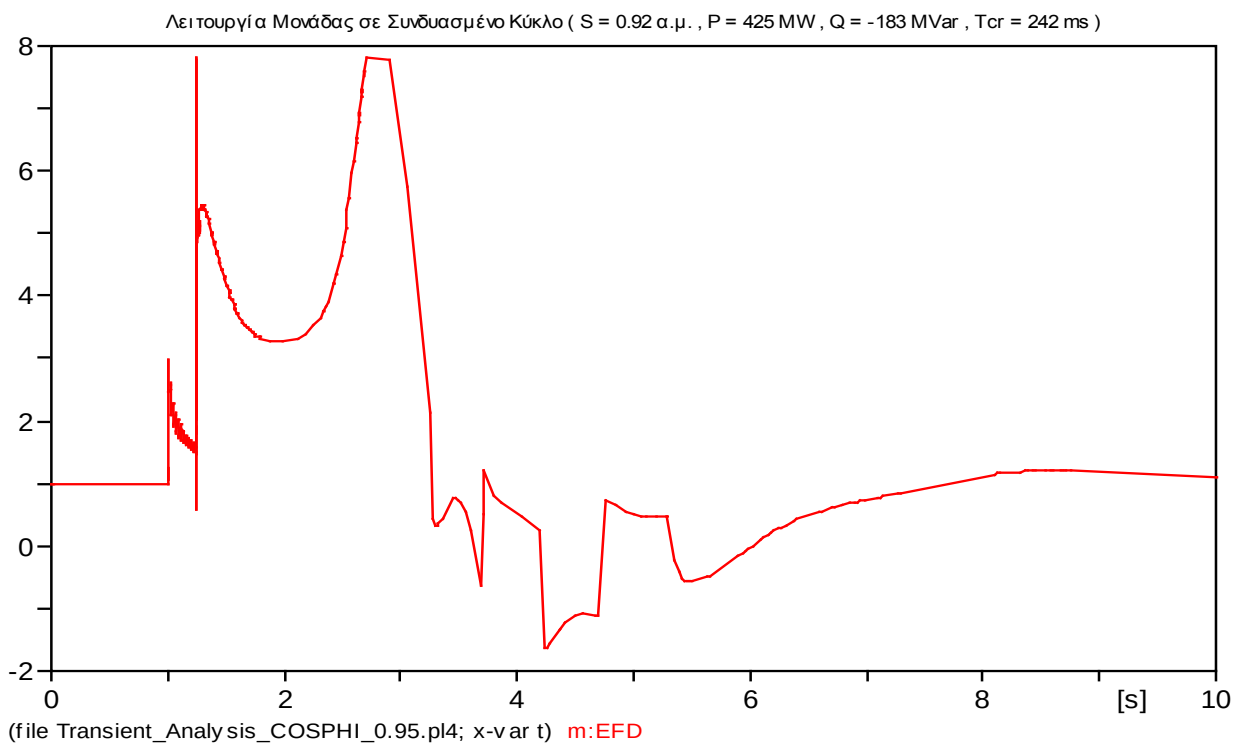


Σχήμα 6.6: Ταχύτητα στρεφόμενου άξονα συναρτήσει του χρόνου

Αντιθέτως, η μείωση της αέργου ισχύος κατά το ήμισυ, υπό σταθερή παραγωγή ενεργού ισχύος, επιβάλλει την εκκαθάριση του σφάλματος σε συντομότερο χρόνο. Επί παραδείγματι υπό φορτίο 0.89 ανά μονάδα και συντελεστή ισχύος 0.95 επαγωγικό, η γεννήτρια παραμένει ευσταθής για σφάλματα διάρκειας έως και 395 ms. Ομοίως για λειτουργία της γεννήτριας στη περιοχή της υπερδιεγέρσεως, ήτοι υπό φορτίο 0.92 ανά μονάδα και συντελεστή ισχύος 0.93 χωρητικό, η ευστάθεια του Σ.Η.Ε. διατηρείται για σφάλματα διάρκειας έως και 242 ms, τουτέστιν για ακόμα μικρότερο κρίσιμο χρόνο εκκαθάρισεως σφάλματος. Στα σχ. 6.7 & 6.8 φαίνονται η τάση ακροδεκτών της γεννήτριας και η ανα μονάδα τάση του τυλίγματος διεγέρσεως. Αξίζει να σημειωθεί η γρήγορη χρονική απόκριση του συστήματος ελέγχου της τάσεως διεγέρσεως σε σχέση με την ελάττωση της τάσεως στους ακροδέκτες της γεννήτριας λόγω του βραχυκυκλώματος. Αυτή οφείλεται στις μικρές σταθερές χρόνου που εξασφαλίζει η χρήση ανορθωτικής διατάξεως με θυρίστορ.



Σχήμα 6.7: Τάση ακροδεκτών γεννήτριας συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 6.8 Τάση τυλίγματος διεγέρσεως γεννήτριας συναρτήσει του χρόνου

Η συμβολή του αυτόματου ρυθμιστή τάσεως και του σταθεροποιητή ισχύος στην ευστάθεια του Σ.Η.Ε. είναι θετική, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερους κρίσιμους χρόνους εκκαθαρίσεως. Παραδείγματος χάρη, η γεννήτρια στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας, ήτοι με φορτίο 1 ανά μονάδα και συντελεστή ισχύος 0.85, και χωρίς τη συμβολή των συστημάτων ελέγχου, παραμένει ευσταθής για χρόνο εκκαθαρίσεως έως τα 379 ms, χρονικό διάστημα μικρότερο των 445 ms που υπολογίστηκαν ανωτέρω, με λειτουργία των προαναφερθέντων συστημάτων.

6.3 Λειτουργία Ανοιχτού Κύκλου

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3, σε λειτουργία ανοιχτού κύκλου, η μέγιστη ισχύς της μονάδος μειώνεται λόγω μη λειτουργίας του λέβητα ανακτήσεως και του ατμοστροβίλου. Υπενθυμίζεται ότι ο αεριοστροβίλος παράγει ισχύ 260 MW. Αξίζει να σημειωθεί η επίδραση της τιμής της στρεφόμενης αδράνειας. Η στρεφόμενη αδράνεια του άξονα της γεννήτριας και της κινητήριας μηχανής μειώνεται σημαντικά καθώς ο συμπλέκτης SSS αποσυμπλέκει τα τρία κελύφη του ατμοστροβίλου, βλέπε Σχήμα 3.7. Η μείωση της στρεφόμενης αδράνειας έχει ως αποτέλεσμα η γεννήτρια να γίνει πιο ευαίσθητη σε σφάλματα. Συγκεκριμένα η λειτουργία της μονάδος σε ανοιχτό κύκλο έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της σταθεράς αδράνειας κατά 37.5%. Με παραγωγή ενεργού ισχύος 260 MW και άεργο φόρτιση 263 MVar, η γεννήτρια διατηρεί την ευστάθεια της για σφάλματα διάρκειας ως και 625 ms. Για όμοια φόρτιση, αλλά με την μονάδα παραγωγής σε λειτουργία συνδυασμένου κύκλου, ως κρίσιμος χρόνος εκκαθαρίσεως ευρίσκονται τα 789 ms.

Στα Σχήματα 6.9 & 6.10 φαίνεται η διακύμανση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής εν συνεχεία τριφασικού βραχυκυκλώματος διάρκειας 600 ms, για τις περιπτώσεις λειτουργίας σε ανοιχτό και συνδυασμένο κύκλο αντίστοιχα. Η διακύμανση του εξεταζόμενου μεγέθους ακολουθεί την βασική συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλαντώσεως, η οποία για την περίπτωση λειτουργίας σε ανοιχτό κύκλο ευρίσκεται ίση με 1.2246 Hz ενώ για την περίπτωση λειτουργίας σε συνδυασμένο κύκλο ευρίσκεται ίση με 0.978 Hz. Πράγματι η συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλαντώσεως γεννήτριας συνδεδεμένης σε άπειρο ζυγό υπολογίζεται από την σχέση:

$$f_{\text{hunting}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/J} \quad (5-5)$$

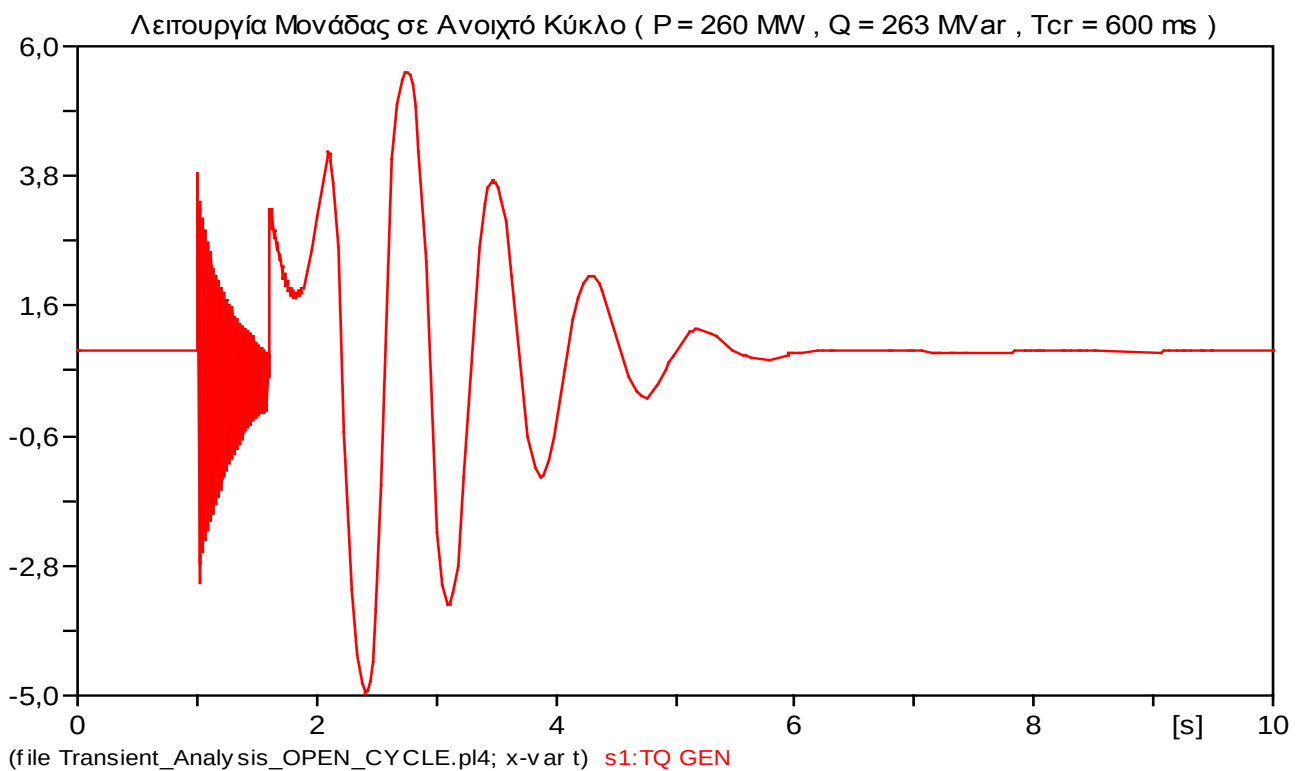
όπου

K ο συντελεστής συγχρονισμού,

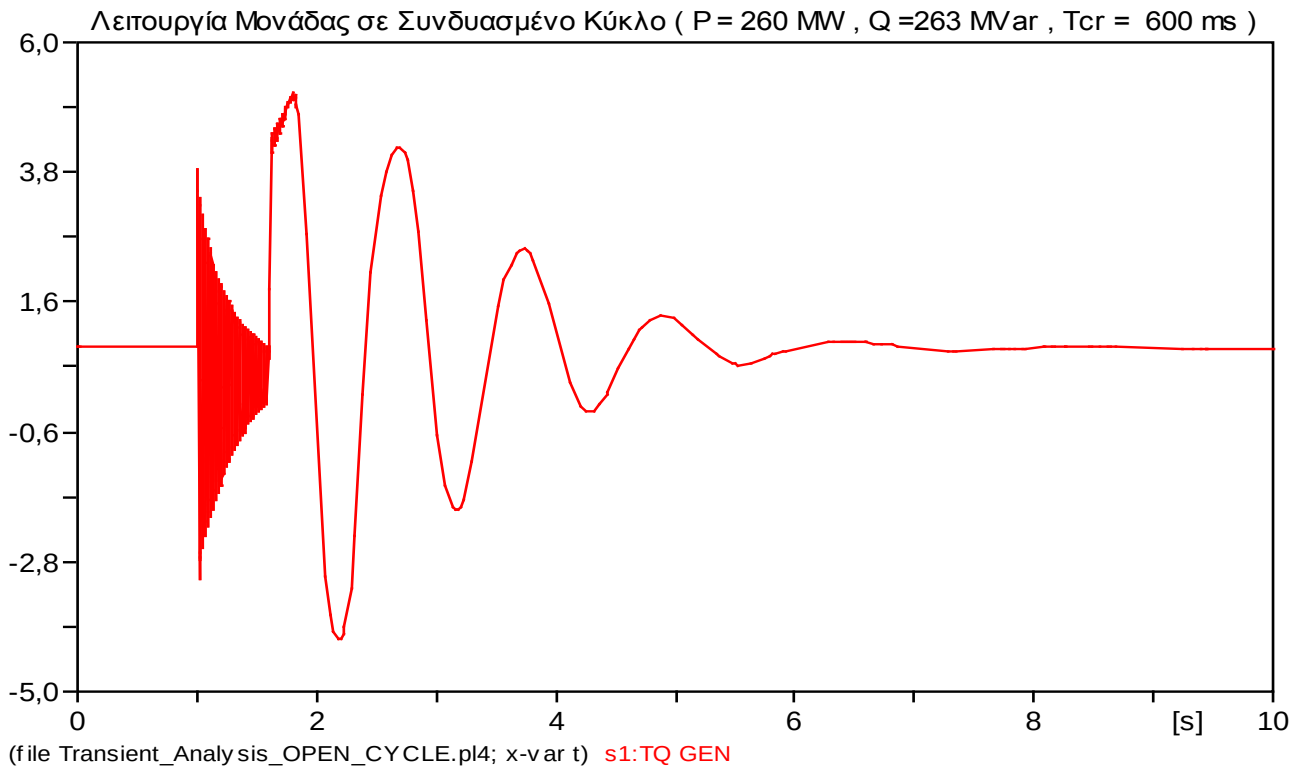
J η στρεφόμενη αδράνεια του συγκροτήματος και

f_{hunting} η συχνότητα της ηλεκτρομηχανικής ταλαντώσεως.

Από τον παραπάνω τύπο προκύπτει ότι μείωση της στρεφόμενης αδράνειας στο 62.5% επιφέρει αύξηση της συχνότητας ηλεκτρομηχανικής ταλαντώσεως ίση με $\sqrt{1/0.625} = 1.265$, ήτοι κατά 26.5%. Η απόσβεση των ταλαντώσεων είναι ασθενέστερη για λειτουργία σε ανοιχτό κύκλο.



Σχήμα 6.9 Ηλεκτρομαγνητική ροπή γεννήτριας συναρτήσει του χρόνου με λειτουργία μονάδος σε ανοιχτό κύκλο



Σχήμα 6.10 Ηλεκτρομαγνητική ροπή γεννήτριας συναρτήσει του χρόνου με λειτουργία μονάδος σε συνδυασμένο κύκλο

6.4 Σχόλια

Όπως αναμενόταν ο κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισεως του σφάλματος μειώνεται καθώς η ενεργός ισχύς P αυξάνεται και καθώς η άεργος ισχύς Q μειώνεται. Ως εκ τούτου είναι λογικό η γεννήτρια να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε σφάλματα στην περιοχή της υποδιεγέρσεως. Συγκεκριμένα με την γεννήτρια λειτουργούσα με συντελεστή ισχύος 0.93 χωρητικό, παρουσιάζεται ο ελάχιστος κρίσιμος χρόνος εκκαθάρισεως ο οποίος υπολογίστηκε ίσος με 242 ms. Ο συντελεστής ισχύος λήφθηκε υπόψη με βάση τα όρια που έχει θέσει η Επιχείρηση Ηλεκτρισμού όσον αφορά τη χωρητική λειτουργία γεννητριών συνδεδεμένων με το δίκτυο.

Αξιοσημείωτη είναι επίσης η επίδραση της τιμής της στρεφόμενης αδράνειας. Πράγματι, όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση της στρεφόμενης αδράνειας έχει ως αποτέλεσμα η γεννήτρια να γίνεται πιο ευαίσθητη σε σφάλματα. Βεβαίως πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι σε λειτουργία ανοικτού κύκλου, άρα με μειωμένη στρεφόμενη αδράνεια, η μέγιστη ισχύς της μονάδος μειώνεται, γεγονός το οποίο

αντισταθμίζει την μείωση της αδράνειας. Επιπλέον αυξάνοντας την στρεφόμενη αδράνεια του άξονα, επιτυγχάνονται μικρότερες και ταχύτερα αποσβένουσες ταλαντώσεις στο δρομέα και επομένως μικρότερη πιθανότητα να οδηγηθεί σε αστάθεια.

Τέλος, καθίσταται σαφής η βελτίωση που έχει επέλθει στη μεταβατική ευστάθεια της σύγχρονης μηχανής μέσω της χρήσης συστημάτων ελέγχου του ρεύματος διεγέρσεως και του Σταθεροποιητή Ισχύος. Τα συγκεκριμένα έχουν πολύ γρήγορη χρονική απόκριση στην κατάρρευση της τάσεως ζυγού της γεννήτριας, ελέγχοντας αναλόγως την τάση στο τύλιγμα διεγέρσεως. Μέσω αυτής παράγουν ροή στο διάκενο της μηχανής η οποία ασκεί μια ροπή αντίθετη προς τη κίνηση του δρομέα, που τείνει να επιταχυνθεί ή να επιβραδυνθεί.

ΒΙΒΛΙΟΦΡΑΦΙΑ

- [1] IEC 60909-0, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents, 2001.
- [2] B. de Metz-Noblat, F. Dumas, C. Poulain, 'Cahier technique no. 158: Calculation of short-circuit currents', Schneider Electric.
- [3] Mircea Eremia, Mohammad Shahidehpour 'Handbook of Electric Power Systems Dynamics: Modeling, Stability and Control', IEEE Book Series
- [4] ANSI C37.5, Guide for Calculation of Fault Currents for Application of AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Total Current Basis.
- [5] J. C. Das, 'Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition and Mitigation' McGraw Hill, 2010
- [6] Μαλατέστας Παντελής, "Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Εκδόσεις Τζιόλα 2014.
- [7] Nasser Tleis, "Power System Modelling and Fault Analysis, Theory and Practice", Elsevier 2008.
- [8] B. de Metz-Noblat, 'Cahier technique no. 18: Analysis of three-phase networks in disturbed operating conditions using symmetrical components', Schneider Electric.
- [9] IEC 60909-1, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 1: Factors for the calculation of short-circuit currents according to IEC 60909-0, 2002.
- [10] IEC 60909-2, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 3: Electrical equipment – Data for short-circuit current calculations in accordance with IEC 909 (1988).
- [11] IEC 60909-4, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents, 2000.
- [12] Rolf Kehlhofer, 'Combined-Cycle Gas & Steam Turbine Power Plants', Pennwell 1997
- [13] Philip Kiameh, 'Power Generation Handbook - Selection, Applications, Operation, and Maintenance', McGraw Hill, 2010
- [14] Frank J. Brooks, 'G.E. Gas Turbine Performance Characteristics', GE Power Systems – GER-3567H
- [15] Meherwan P. Boyce, 'Gas Turbine Engineering Handbook Third Edition', Elsevier Inc. 2006

- [16] Frank J. Brooks 'GE Gas Turbine Performance Characteristics', GE Power Systems, GER-3567H.
- [17] D.L. Chase, P.T. Kehoe 'GE Combined-Cycle Product Line and Performance', GE Power Systems, GER-3574G.
- [18] Dave Colegrove, Paul Mason, Klaus Retzlaff, Daniel Cornell 'Structured Steam Turbines for the Combined-Cycle Market', GE Power Systems, GER-4201.
- [19] 'Siemens Combined Cycle Reference Power Plant SCC5-4000P 1S', Copyright by Siemens 2008, Energy Sector.
- [20] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Standard 421.5-2005.
- [21] IEC 60076-1, Power transformers - Part 1: General, Edition 2.1 (2000-04)
- [22] Neplan Power System Analysis and Engineering, www.neplan.ch
- [23] ATP Rule Book, Latest revision date: 04/01/02
- [24] EMTP Theory Book
- [25] Neville Watson, Jos Arrillaga 'Power Systems Electromagnetic Transients Simulation' IET Power and Energy Series 39, 2007.
- [26] EMTP Development Coordination Group, Electric Power Research Institute, "EMTP Workbook 1", EL-4651, Research Project 2149-6.
- [27] Dr. Eiichi Haginomori, "Highly Sophisticated Electric Power Systems", <http://gundam.eei.eng.osaka-u.ac.jp/haginomori/>
- [28] A. Murdoch, S. Venkataraman, R.A. Lawson, W.R. Pearson, "Integral of Accelerating Power Type PSS, Part 1 – Theory, Design, and Tuning Methodology", IEEE Trans. on EC, Vol. 14, No. 4, Dec. 1999.
- [29] "IEEE Standard Test Code for Dry-Type Distribution and Power Transformers", IEEE Std. C57.12.91-2001 (Revision of IEEE Std. C57.12.91-1995).
- [30] Κουκουβίνης Φοίβος, "Μοντελοποίηση μονάδων ηλεκτροπαραγωγής για τον υπολογισμό της αύξησης του βαθμού απόδοσης από στοχοθετημένες δράσεις", Διπλωματική εργασία (ΕΜΠ), Αθήνα 2008
- [31] Δημήτριος Α. Παπανδρέου, "Σχεδίαση και μελέτη σταθεροποιητών για την απόσβεση τοπικών ρυθμών και ρυθμών διασυνδέσεως σε Σ.Η.Ε.", Διπλωματική εργασία (ΕΜΠ), Αθήνα 2008

ΥΠΟΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

- 1.1 Το πρωτότυπο ελήφθη από το [2], figure 5.
- 1.2 Ελήφθη από το [3], figure 5.2.
- 1.3 Ελήφθη από το [3], figure 5.2.
- 1.4 Το πρωτότυπο ελήφθη από το [2], figure 6.
- 1.5 Ελήφθη από το [5], figure 2.12.
- 1.6 Ελήφθη από το [2], figure 10.
- 1.7 Βλέπε [6], Κεφάλαιο 2, παρ. 9, σελ. 54.
- 1.8 Βλέπε [5], Κεφάλαιο 9, σελ. 211.
- 1.9 Βλέπε [6], Κεφάλαιο 2, παρ. 13, σελ. 83.
- 2.1 Ελήφθη από το [1], figure 4b.
- 2.2 Ελήφθη από το [1], Table 1.
- 2.3 Ελήφθη από το [1], figure 10.
- 2.4 Ελήφθη από το [11], παρ. 2.3, σελ. 29.
- 3.1 Ελήφθη από το [15], figure 2.2.
- 3.2 Ελήφθη από το [15], figure 21.2.
- 3.3 Το πρωτότυπο ελήφθη από το [17], figure 3.
- 3.4 Το πρωτότυπο ελήφθη από το [16], figure 2.
- 3.5 Το πρωτότυπο ελήφθη από το [18], figure 4.
- 3.6 Το πρωτότυπο ελήφθη από το [17], figure 4.
- 3.7 Το πρωτότυπο ελήφθη από το [19], σελ.2.
- 3.8 Ελήφθη από το [20], figure 7.1.
- 3.9 Ελήφθη από το [20], figure 8.2.
- 3.10 Το πρωτότυπο ελήφθη από το [21], figure D-1.
- 4.1 Βλέπε [10], σελ. 27, Table 4.
- 4.2 Βλέπε [1], σελ. 67, και [7], σελ. 454.
- 4.3 Βλέπε [11] Table 1, σελ. 19
- 4.4 Βλέπε στο [11] Table 1 σελ. 19.
- 4.5 Βλέπε επίσης στο [3] Table 5.2 σελ. 250.
- 4.6 Βάσει του [1], Table 3.
- 4.7 Βάσει του [11], Table 9.

- 4.8 Βάσει του [11], Table 8.
- 4.9 Ελήφθη από το [3], figure 5.26.
- 4.10 Ελήφθη από το [3], figure 5.27.
- 4.11 Ελήφθη από το [3], figure 5.28.
- 5.1 Ελήφθη από ηλεκτρονικό υλικό σημειώσεων του εργαστηρίου Υ.Τ. του Πανεπιστημίου Πατρών.
- 5.2 Ελήφθη από το [25], figure 7.20.
- 5.3 Βλέπε [26], Section 15.
- 5.4 Ελήφθη από το [23], παρ. IV.E.3., σελ. 12.
- 5.5 Ελήφθη από το [23], σελ. 4C-1.